



Ana Luísa Inocência Ramada

Licenciada em Engenharia Geológica

**Integração de dados de distintas origens para a estimação
geoestatística de superfícies do Cretácico Inferior, na
região de Lisboa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica

Orientadora: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Rayco Marrero Diaz – UGHGC/LNEG

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano

Arguente: Prof. Doutor José António de Almeida

Vogal: Prof. Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2016

Integração de dados de distintas origens para a estimação geoestatística de superfícies do Cretácico Inferior, na região de Lisboa

“© Copyright” Ana Luísa Inocência Ramada, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos dirigem-se às pessoas e entidades que contribuíram para a concretização desta tese, às quais gostaria de expressar o meu reconhecimento.

Sendo este trabalho o culminar do Mestrado em Engenharia Geológica, começo por agradecer a todos os docentes que têm acompanhado o meu percurso académico na FCT-UNL e que tiveram um papel importante, na medida em que contribuíram para a minha formação.

Destaco a Doutora Sofia Barbosa, orientadora desta tese, a quem agradeço a disponibilidade, apoio e incentivo prestados, que foram imprescindíveis para a realização do trabalho.

Ao Doutor José António de Almeida, coordenador do curso, expresso também o meu agradecimento pela prontidão com que sempre me esclareceu.

Agradeço à equipa do Laboratório Nacional de Energia e Geologia pelo apoio e interesse demonstrados, que muito contribuíram para o meu enriquecimento, tanto a nível académico, como pessoal.

Indispensável agradecimento ao Doutor Rayco Marrero Diaz, co-orientador da tese, com quem tem sido um privilégio trabalhar. Em particular, agradeço a constante partilha de conhecimentos, sem esquecer, claro, que foi o impulsionador da própria tese. Não posso igualmente deixar de mencionar como o seu constante incentivo foi relevante nesta etapa. Por isso e pelas mais "pequenas" coisas, que aqui não cabem, tenho-o como um exemplo de profissional e ser humano.

Ao João Carvalho, pelo acompanhamento na interpretação dos dados sísmicos, fundamental para o desenvolvimento do trabalho, devo um especial agradecimento.

Ao Vasco Valadares, Rúben Dias, Ricardo Ressurreição agradeço os contributos prestados em contexto de saída de campo, que permitiram uma perspetiva realista dos afloramentos observados na cartografia geológica.

Agradeço também à Paula Candeias, que agilizou o acesso à bibliografia, e ao Pedro Patinha, pelo apoio na instalação do *software* ArcGIS©.

Expresso os meus sinceros agradecimentos à Agência Portuguesa do Ambiente, nomeadamente a António Dias da Silva, Fátima Alves, Henrique Bello e Sandra Szilard, por terem permitido o acesso aos relatórios dos furos de captação de águas subterrâneas, essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Igualmente agradeço à Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis, nomeadamente ao Doutor José Miguel Martins, pela gentileza na disponibilização da informação sísmica e gravimétrica.

A todos os colegas e amigos que, de alguma forma contribuíram para este estudo, agradeço o apoio e motivação.

Não posso deixar de mencionar a Ana Rita Ferreira, a Catarina Fernandes, o David Silva, o João Miranda, a Mariana Pinto, o Raul Conceição, a Soraia Botelho e a Yucânia Cruz, pela constante disponibilidade em todas as etapas do meu percurso académico, e acima de tudo, pela partilha de tantos e bons momentos, que sempre guardarei.

Devo também um sincero agradecimento à Ana Rita Carvalho, pela amizade ao longo destes anos, e por ter sempre uma palavra de alento que me incentivou a continuar.

Agradeço ao David Reis, por me aconselhar e motivar constantemente para este trabalho e, simplesmente, por estar presente na minha vida.

Termino com um agradecimento muito especial, à minha família, pelo constante encorajamento e compreensão nesta fase.

Ao meu irmão, João Ramada, por saber sempre como me deixar a sorrir, que foi tão importante nesta etapa.

Aos meus pais, Helena e Rui Ramada, deixo aqui uma palavra de gratidão, por serem para mim exemplos ímpares de seres humanos que me apoiam incondicionalmente e incentivam a ser sempre melhor.

Muito obrigada!

RESUMO

A conciliação de dados provenientes de fontes distintas para fins de modelação é um desafio atual para as geociências.

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver uma metodologia de suporte à modelação geológica tridimensional (3D), em que se pretende obter uma representação geométrica subsuperficial de unidades litostratigráficas que evidenciam potencial geotérmico, ocorrentes na área de estudo da região de Lisboa. A metodologia repartiu-se em três etapas principais: construção de uma base de dados, processamento de dados e modelação geoestatística.

A construção da base de dados envolveu o levantamento e seleção de diferentes tipos de informação, a partir de fontes distintas (geologia, hidrogeologia, geofísica), tendo-se efetuado a respetiva integração numa única base de dados georreferenciada e detalhada, que foi refinada.

O agrupamento de dados com níveis de detalhe distintos mostrou a necessidade de processamento adicional dos dados selecionados para a modelação, segundo um método iterativo de retificação.

A modelação geoestatística seguiu uma metodologia genérica de variografia, estimação e validação. A estimação geoestatística foi adaptada a cada caso, tendo-se utilizado: *krigagem* ordinária para gerar o topo da unidade litostratigráfica 6-Almargem; *co-krigagem* co-localizada para estimar o topo da unidade 7-Barremiano-Berriasiano, devido à elevada correlação entre ambas; *krigagem* simples com médias locais para aprimorar as duas unidades.

A visualização 3D das superfícies geradas permitiu validar o modelo geoestatístico, na medida em que o cruzamento das tendências de variação das cotas com os dados de partida mostrou valores coerentes de estimação, à luz do conhecimento pericial que se tem da situação em estudo.

PALAVRAS-CHAVE

MODELAÇÃO GEOLÓGICA 3D; CONCILIAÇÃO DE DADOS; REGIÃO DE LISBOA; ESTIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA; POTENCIAL GEOTÉRMICO; KRIGAGEM.

ABSTRACT

The data conciliation from distinct sources for modeling purposes is a current challenge for the geosciences.

The objective of this study was to develop a methodology to support the construction of a three-dimensional (3D) geological model, with the intent of obtaining a subsurface geometric representation of lithostratigraphic that reveal geothermal potential, which occur in the study area of Lisbon region. The methodology was divided in three main steps: construction of a database, processing of data and geostatistical modeling.

The construction of the database involved survey and selection of different information types from distinctive sources (geology, hydrogeology, geophysics), having done the respective integration into a single, georeferenced and detailed database which has been refined.

The grouping of data with different levels of detail showed the need for additional processing of the data selected for modeling, according to an iterative method of rectification.

Geostatistical modelling followed a generic methodology of variogram, estimation and validation. The geostatistical estimation was adapted to each case, having been used: ordinary kriging to generate the 6-Almargem lithostratigraphical unit top; collocated co-kriging to estimate the top of 7-Barremian-Berriasian unit, due to the high correlation therebetween; simple kriging with local means to improve both units.

The 3D visualization of the generated surfaces has enabled the validation of the geostatistical model, in the manner that the crossing of the trends of altitude variations with the starting data showed consistent estimation values, in the light of the expert knowledge we have of the situation under study.

KEYWORDS

3D GEOLOGICAL MODELLING; GROUPING DATA; LISBON REGION; GEOSTATISTICAL ESTIMATION; GEOTHERMAL POTENTIAL; KRIGING.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Estado-da-arte.....	3
1.2. Enquadramento Geográfico.....	4
1.3. Enquadramento Geológico.....	4
1.4. Objetivos e Faseamento dos Trabalhos	8
2. CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS	11
2.1. Pré-processamento	11
2.1.1. Levantamento e seleção da informação	11
2.1.2. Organização e georreferenciação	11
2.2. Processamento: Análise, interpretação e tratamento da informação	12
2.2.1. Registo das unidades litostratigráficas da área em estudo.....	12
2.2.2. Integração dos dados geológicos	14
2.2.3. Integração dos dados hidrogeológicos	17
2.2.4. Integração dos dados geofísicos 2D	19
2.3. Aprimoramento da base de dados.....	23
3. PROCESSAMENTO DE DADOS	25
3.1. Simplificação	25
3.1.1. Análise do comportamento estatístico dos dados	26
3.1.2. Análise do comportamento espacial dos dados	28
3.2. Retificação dos inputs	29
3.2.1. Eliminação de pontos	29
3.2.2. Introdução de novos pontos	31
3.3. Síntese do processamento da base de dados.....	33
4. MODELAÇÃO GEOESTATÍSTICA	35
4.1. Apresentação da metodologia	35
4.2. Aplicação ao caso de estudo	40
4.2.1. Unidade litostratigráfica 6-Almargem	40
4.2.2. Unidade litostratigráfica 7-Barremiano-Berriasiano.....	56
4.3. Visualização 3D e validação.....	68
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	77
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização geográfica dos furos Ms-1, Br-1, Br-2, Br-3 e AC1-Balum. Corte simplificado com os referidos furos e principais características dos aquíferos.	2
Figura 1.2 - Enquadramento geográfico da área de estudo.	4
Figura 1.3 - Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitaniana. Divisão da Bacia Lusitaniana, em setores e sub-bacias.	5
Figura 1.4 - Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Lusitaniana.	7
Figura 1.5 - Mapa geológico da área de estudo identificando os principais diapiros e os episódios magmáticos de Sintra (CIS) e de Lisboa (CVL) e localização das sub-bacias. Mapa geológico unificado na escala 1:50 000, com unidades litostratigráficas e falhas.	7
Figura 1.6 - Fluxograma de faseamento dos trabalhos.	8
Figura 2.1 - Aspeto da unidade litostratigráfica 3-CVL-MSVS antes (acima) e depois (baixo) da eliminação dos pontos pouco representativos dos seus limites, obtidos da cartografia geológica.	15
Figura 2.2 - Detalhe do mapa geológico simplificado da área de estudo.	16
Figura 2.3 - Coluna litológica do furo de captação de águas subterrâneas LM85, extrato do relatório de execução.	18
Figura 2.4 - Localização dos furos considerados para a modelação na área em estudo.	18
Figura 2.5 - Localização das linhas sísmicas na área em estudo.	19
Figura 2.6 - Aspeto do perfil sísmico da linha AR16-81 com o horizonte topo das unidades litostratigráficas e falhas prováveis interpretados.	22
Figura 3.1 - Localização da janela de modelação na área em estudo.	25
Figura 3.2 - Distribuição espacial dos pontos da <i>Cartografia detalhada</i> nas unidades 6 e 7.	28
Figura 3.3 - Distribuição espacial dos pontos dos <i>Furos</i> nas unidades 6 e 7.	29
Figura 3.4 - Distribuição espacial dos pontos da <i>Sísmica</i> nas unidades 6 e 7.	29
Figura 3.5 - Distribuição espacial dos pontos da <i>Cartografia simplificada</i> nas unidades 6 e 7.	30
Figura 3.6 - Localização do furo AC1-BALUM e dos cortes geológicos considerados para complementar a informação no setor oriental da área em estudo.	32
Figura 3.7 - Distribuição espacial dos <i>Pontos de Controlo</i> nas unidades 6 e 7.	32
Figura 3.8 - Localização dos dados da unidade 6 e unidade 7, por fonte: 1- <i>Cartografia detalhada</i> , 2- <i>Furos</i> , 3- <i>Sísmica</i> , 4- <i>Cartografia simplificada</i> , 5- <i>Pontos de Controlo</i>	34
Figura 4.1 - Fluxograma de metodologia para a estimação do topo da unidade 6.	38
Figura 4.2 - Fluxograma de metodologia para a estimação do topo da unidade 7.	39
Figura 4.3 - Distribuição espacial dos dados de partida, considerados para a estimação primária da unidade 6.	40
Figura 4.4 - Estatísticos simples dos dados de partida, considerados para a estimação primária da unidade 6.	41
Figura 4.5 - Modelo variográfico omnidirecional ajustado com duas estruturas.	43
Figura 4.6 - Modelo variográfico ajustado com duas estruturas na direção (-80, 0) e (10, 0).	43
Figura 4.7 - Modelo variográfico ajustado com três estruturas na direção (-80, 0) e (10, 0).	44
Figura 4.8 - Modelo variográfico omnidirecional com duas estruturas, superfície topo e respetiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida.	45
Figura 4.9 - Modelo variográfico com duas estruturas na direção principal, superfície topo e respetiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida.	46
Figura 4.10 - Modelo variográfico direcional com três estruturas na direção principal (-80,0), superfície topo e respetiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida.	46
Figura 4.11 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação primária da unidade 6.	48
Figura 4.12 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação primária da unidade 6.	49
Figura 4.13 - Estatísticos simples da superfície selecionada da unidade 6, estimada por <i>krigagem</i> ordinária.	49
Figura 4.14 - Superfície topo estimada por <i>krigagem</i> ordinária e retificada da unidade 6.	50
Figura 4.15 - Distribuição espacial dos dados de partida " <i>hard data</i> ", considerados para a estimação secundária da unidade 6.	51
Figura 4.16 - Estatísticos simples dos dados de partida " <i>hard data</i> ", considerados para a estimação secundária da unidade 6.	51
Figura 4.17 - Modelo variográfico da variável primária, ajustado com três estruturas, na direção (-80, 0) e (10, 0).	52
Figura 4.18 - Superfície topo e respetiva variância relativa de estimação com confrontação dos dados de partida.	52
Figura 4.19 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação secundária da unidade 6.	53
Figura 4.20 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação secundária da unidade 6.	54
Figura 4.21 - Estatísticos simples da superfície da unidade 6, estimada por <i>krigagem</i> simples com médias locais.	55

Figura 4.22 - Superfície topo da unidade 6, estimada por <i>krigagem</i> simples com médias locais e retificada.....	55
Figura 4.23 - Diagrama de dispersão e linha de regressão linear da correlação entre as cotas dos topos das unidades 6 e 7.....	56
Figura 4.24 - Distribuição espacial dos dados de partida da variável primária, considerados para a estimação primária da unidade 7..	57
Figura 4.25 - Estatísticos simples dos dados de partida da variável primária, considerados para a estimação primária da unidade 7.	58
Figura 4.26 - Modelos variográficos, ajustados com três estruturas, da variável primária e secundária.	59
Figura 4.27 - Superfície topo estimada por <i>co-krigagem</i> co-localizada e respetiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida.....	59
Figura 4.28 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação primária da unidade 7.	60
Figura 4.29 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação primária da unidade 7.	61
Figura 4.30 - Estatísticos simples da superfície da unidade 7, estimada por <i>co-krigagem</i> co-localizada.	62
Figura 4.31 - Distribuição espacial dos dados de partida " <i>hard data</i> ", considerados para a estimação secundária da unidade 7.	63
Figura 4.32 - Estatísticos simples dos dados de partida " <i>hard data</i> ", considerados para a estimação secundária da unidade 7.....	63
Figura 4.33 - Modelo variográfico omnidirecional da variável primária, ajustado com três estruturas.....	64
Figura 4.34 - Superfície topo estimada por <i>krigagem</i> simples com médias locais e respetiva variância relativa de estimação com confrontação dos dados de partida	64
Figura 4.35 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação secundária da unidade 7.	65
Figura 4.36 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação secundária da unidade 7.	66
Figura 4.37 - Estatísticos simples da superfície da unidade 7, estimada por <i>krigagem</i> simples com médias locais.	67
Figura 4.38 - Superfície topo da unidade 7, estimada por <i>krigagem</i> simples com médias locais e retificada.....	67
Figura 4.39 - Visualização planar das <i>grids</i> geradas na direção N-S, correspondentes aos modelos que produziram os melhores resultados da unidade 6 e 7.....	69
Figura 4.40 – Sobreposição 3D da cartografia geológica na escala 1: 50 000 com a superfície correspondente ao modelo que produziu o melhor resultado do topo da unidade 6.	69
Figura 4.41 – Ampliação do setor oriental da área de estudo e sobreposição 3D da cartografia geológica na escala 1: 50 000 com a superfície correspondente ao modelo que produziu o melhor resultado da unidade 6, nas direções ENE-WSW e E-W	70
Figura 4.42 - Visualização 3D, na direção NE-SW, das <i>grids</i> correspondentes ao modelos que produziram os melhores resultados da unidade 6 e 7, confrontando com a informação de partida.	71
Figura 4.43 - Visualização da <i>grid</i> gerada a 3D, correspondente ao modelo que permitiu os melhores resultados da unidade 6, com a localização do furo AC1-BALUM e do anticlinal de Monsanto.	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Síntese bibliográfica dos dados utilizados.....	11
Tabela 2.2 - Unidades litostratigráficas selecionadas da área a estudar e siglas das formações consideradas das respectivas folhas da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000 e notícias explicativas.	12
Tabela 2.3 - Síntese da base de dados.	23
Tabela 3.1 - Análise univariada preliminar dos dados do topo da unidade 6.....	26
Tabela 3.2 - Análise univariada preliminar dos dados do topo da unidade 7.....	27
Tabela 3.3 - Comparação e diferenças no total de pontos entre as unidades 6 e 7, em função da fonte.	28
Tabela 3.4 - Análise univariada preliminar da <i>Cartografia simplificada</i> na unidade 6.....	30
Tabela 3.5 - Análise univariada preliminar da <i>Cartografia simplificada</i> na unidade 7.....	30
Tabela 3.6 - Análise univariada preliminar dos <i>Pontos de Controlo</i> na unidade 6.	33
Tabela 3.7 - Análise univariada preliminar dos <i>Pontos de Controlo</i> na unidade 7.	33
Tabela 3.8 - Total de pontos, em função da fonte, para as unidades 6 e 7.....	33
Tabela 4.1 - Parâmetros de modelização variográfica omnidirecional com duas estruturas.....	42
Tabela 4.2 - Parâmetros de modelização variográfica direcional com duas estruturas.....	43
Tabela 4.3 - Parâmetros de modelização variográfica direcional com três estruturas.	44
Tabela 4.4 - Parâmetros considerados na estimação, para a geração da <i>grid</i>	44
Tabela 4.5 - Estatísticos simples dos erros de estimação primária da unidade 6.	49
Tabela 4.6 - Parâmetros de modelização variográfica da variável primária.	52
Tabela 4.7 - Estatísticos simples dos erros de estimação secundária da unidade 6.	54
Tabela 4.8 - Comparação entre os erros da estimação primária e secundária.	56
Tabela 4.9 - Parâmetros de modelização variográfica da variável primária e cruzada.	58
Tabela 4.10 - Estatísticos simples dos erros de estimação primária da unidade 7.....	61
Tabela 4.11 - Parâmetros de modelização variográfica omnidirecional, com três estruturas, da variável primária.....	64
Tabela 4.12 - Estatísticos simples dos erros de estimação secundária da unidade 7.	66
Tabela 4.13 - Comparação entre os erros da estimação primária e secundária.	68

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo obter uma metodologia passível de utilização no apoio à construção de modelos geológicos tridimensionais (3D), na componente específica da estimação de superfícies representativas do topo e base de unidades litostratigráficas. A área de estudo foi a região de Lisboa, tendo-se selecionado, para o efeito, dados de distintas origens relativos a várias unidades. Pretendeu-se, com o caso de estudo desenvolvido, modelar superfícies correspondentes a unidades que detêm particular interesse em termos do potencial geotérmico.

O facto de um modelo ser uma representação da realidade acarreta que exista seleção, simplificação e interpretação por parte de quem o constrói e avalia. Neste sentido, um bom modelo geológico deve conter toda a informação existente para se aproximar o mais possível da realidade, sendo a sua principal finalidade a de melhorar o conhecimento da área em estudo. Portanto, o modelo geológico resultante é, em grande parte, dependente dos dados disponíveis, que são geralmente escassos e dispersos.

A conciliação de dados com origem em várias fontes constitui um desafio atual para as geociências. De acordo com Bigi *et al.* (2013) a crescente capacidade dos *software* de modelação para integrar e visualizar dados de diferentes fontes num ambiente 3D permite avaliações cada vez mais críticas e uma convergência cada vez maior das interpretações possíveis. A modelação e correspondente representação 3D da geometria das superfícies geológicas (topos e bases) em formato digital constitui uma importante ferramenta de apoio à decisão em diversos setores, refira-se a avaliação do potencial geotérmico, gestão de aquíferos, geotecnia, armazenamento de CO₂ e geologia estrutural, entre outras.

A área de estudo da presente tese é a região de Lisboa, abrangendo aproximadamente 960 km². A opção por esta área prende-se com o facto de a geotermia ser um recurso estratégico autóctone, no sentido que deve ser prospetado onde exista procura. Efetivamente constata-se que na Grande Lisboa, onde se insere a área em estudo, habita uma parte significativa da população nacional (cerca de 19%¹), o que se traduz numa acentuada procura de energia; deste modo, nesta área poderá vir a encarar-se a geotermia como uma possibilidade de aproveitamento energético amigo do ambiente.

Do ponto de vista do contexto geológico, a região de Lisboa localiza-se na Orla Meso-Cenozóica Ocidental e apresenta depósitos que formam parte da Bacia Lusitaniana e da Bacia do Baixo Tejo. É amplamente conhecido que as grandes bacias sedimentares são favoráveis para a existência de aquíferos profundos que, com um gradiente geotérmico médio de 33 °C/km, também são suscetíveis de ser exploradas como reservatórios geotérmicos de baixa entalpia (e.g. Lopez *et al.*, 2010; Ungemach *et al.*, 2010). Embora o gradiente geotérmico estimado para a região de Lisboa varie entre 20 e 25 °C/km (Ramalho, 2013), existem evidências que indicam que a dita região apresenta um considerável potencial geotérmico de baixa entalpia (Marrero-Diaz *et al.*, 2015).

¹ 19%, considerando 2,0·10⁶ habitantes na Grande Lisboa e 10,4·10⁶ habitantes em Portugal. Dados *in* www.ine.pt, relativos a censos de 2013.

Nas décadas de 1950-1960, os furos de pesquisa de petróleo Ms-1, Br-1, Br-2 e Br-3 (Figura 1.1), confirmaram a existência na região de fluidos com temperaturas até 75 °C em formações sedimentares mesozóicas profundas (Correia *et al.*, 2002).

Na década de 1990 existiram também na região de Lisboa os projetos de aproveitamento geotérmico do Hospital da Força Aérea, no Lumiar (furo AC1-Balum, ver Figura 1.1) e dos Serviços Sociais das Forças Armadas, em Oeiras (Carvalho *et al.*, 1990; Carvalho e Cardozo, 1994; Marrero-Diaz *et al.*, 2015). A profundidade do furo, caudal de extração, e temperatura atingida foram 1500 m, 5 l/s, 50 °C e 475 m, 6 l/s, 30 °C, para os furos do Lumiar e Oeiras, respetivamente. Em ambos os projetos, atualmente inativos, foram exploradas formações gresosas com aptidão aquífera do Barremiano Superior - Albiano Inferior (Cretácico Inferior), correspondentes aos *Grés de Almargem* (LNEG, 2011; Rey, 1992).

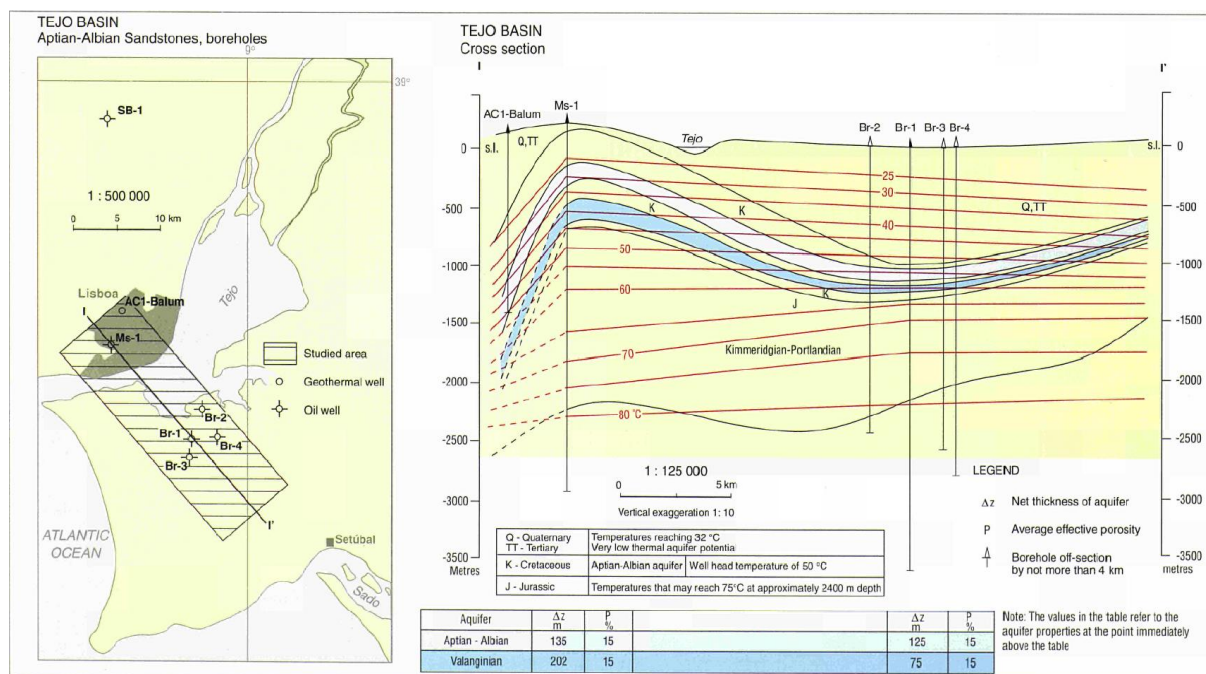


Figura 1.1 - Esquerda: Localização geográfica dos furos Ms-1, Br-1, Br-2, Br-3 e AC1-Balum. **Direita:** Corte simplificado com os referidos furos e principais características dos aquíferos. Extraído de Correia *et al.*, (2002).

Na região de Lisboa também foram identificadas várias captações de águas subterrâneas que exploraram ou exploram os *Grés de Almargem* para fins de abastecimento, industriais e rega. Segundo Marrero-Diaz *et al.* (2013) e referências inclusas, do ponto de vista hidrogeológico esta formação corresponde a um aquífero multicamada, semiconfinado e geralmente artesiano, com propriedades hidrogeológicas interessantes, designadamente porosidade efetiva entre 15 e 25 % e transmissividades até 400 m²/d, que permitiram caudais de exploração até 50 l/s.

Por estas razões, e tendo em conta o objetivo do trabalho, a referida formação dos *Grés de Almargem* foi considerada prioritária na presente tese. A construção de um modelo geológico 3D na

área em estudo, a partir da integração de informação de todas as fontes disponíveis, permitirá colmatar a falta de dados em profundidade, nomeadamente da fonte sísmica, relativos a esta formação geológica e a outras subjacentes. Será então possível inferir o comportamento, em termos geométricos, das formações com potencial geotérmico, ao mesmo tempo que poderá aumentar o conhecimento geológico, bem como das características hidrogeológicas e hidrodinâmicas.

1.1. Estado-da-arte

Historicamente, os modelos 3D utilizados em atividades ligadas às geociências eram construídos unicamente com base num tipo de dados: no setor mineiro geralmente utilizavam-se apenas observações geológicas diretas (como sondagens) e no caso da geofísica utilizavam-se somente dados geofísicos. Chalke e McGaughey (2015) referem que estes modelos tinham associada uma elevada incerteza devido à insuficiência de dados, e por isso, defendem a integração de todos os dados disponíveis com o fim de refinar a forma, profundidade, volume e outros aspetos que fazem parte de um modelo geológico. Compreende-se, portanto, a importância da integração de dados múltiplos, com origens distintas, todas as que forem consideradas relevantes para um trabalho com objetivos de modelação, como é o caso da presente tese.

Segundo Baldé (2012), a modelação geológica 3D recorre a algoritmos geoestatísticos para aliar a correlação espacial à previsão dos valores da variável em estudo, em locais não amostrados.

A geoestatística é um conjunto de instrumentos estatísticos que caracterizam espacialmente os fenómenos naturais. Soares (2006) indica que esta terá surgido da necessidade da modelização de recursos geológicos, como metais em jazigos minerais, na década de 1960. No entanto, de acordo com Luís (2004), os primeiros trabalhos que expressam a noção de dependência espacial em fenómenos naturais são da autoria de Krige (Krige, 1951). As suas conclusões empíricas levaram Matheron (Matheron, 1965), a desenvolver a teoria das variáveis regionalizadas (VR), que concilia a dependência espacial com uma característica aleatória. A teoria das VR assenta no conceito de variável aleatória, que é expressa por uma função aleatória. Estavam assim estabelecidos os princípios fundamentais da geoestatística, que são atualmente aceites.

O sucesso da geoestatística no setor mineiro justificou que a sua aplicação tenha sido estendida a outras áreas, nomeadamente ao ambiente (em finais da década de 1970) e à prospeção de petróleo (na década de 1980), como refere Soares (2006). Contudo, até ao início da década de 1990 a geoestatística tinha bastante mais peso nas aplicações mineiras e petrolíferas, em comparação com as ambientais (Soares, 2009).

Atualmente a utilização da geoestatística abrange todas as ciências que utilizam dados com correlação espacial. Landim (2006) salienta a agricultura de precisão, a cartografia, a climatologia, entre outras.

1.2. Enquadramento Geográfico

A área em estudo localiza-se na região de Lisboa, ocupando uma área de aproximadamente 960 km² que abrange os concelhos de Mafra, Loures, Odivelas, Amadora, Sintra, Lisboa, Cascais e Oeiras. Na Figura 1.2 apresenta-se a localização da área a nível nacional e distrital.

A Grande Lisboa tem uma população de aproximadamente 2 milhões de habitantes, o que corresponde a cerca de 19 % da população nacional.

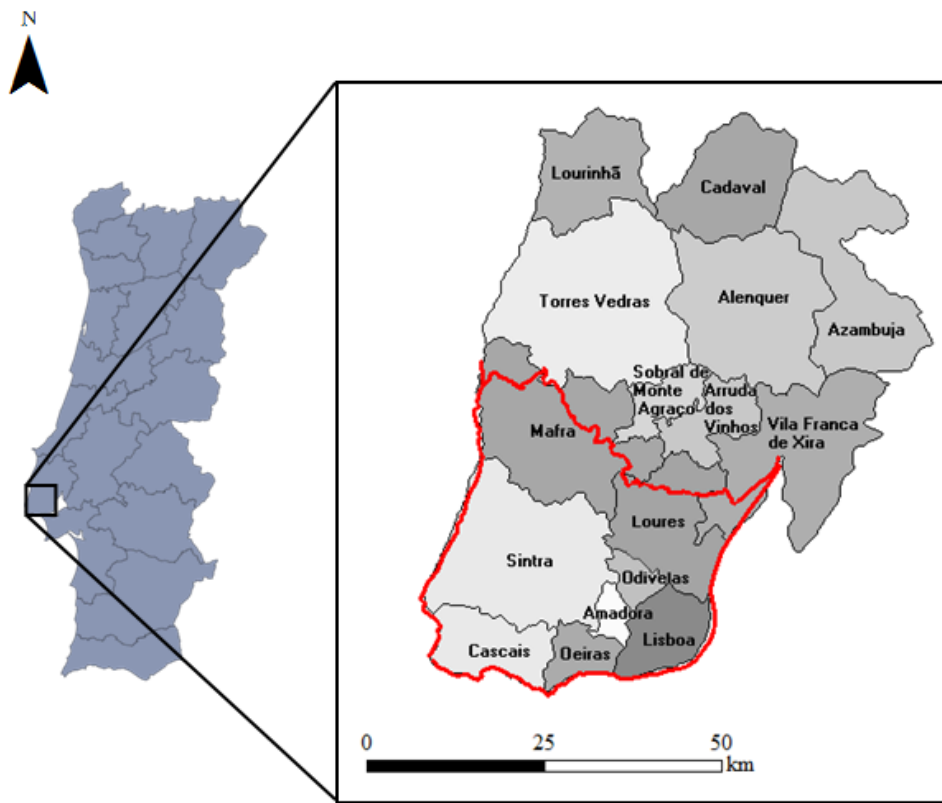


Figura 1.2 - Enquadramento geográfico da área de estudo. **Esquerda:** localização a nível nacional, **direita:** ampliação a nível distrital, com os limites representados a vermelho.

1.3. Enquadramento Geológico

A região de Lisboa localiza-se na Orla Meso-Cenozóica Ocidental, identificando-se depósitos pertencentes às unidades tectono-sedimentares da Bacia Lusitaniana e da Bacia do Baixo Tejo, sendo esta última uma porção da Bacia do Tejo-Sado. De acordo com a divisão proposta por Ribeiro *et al.* (1996) e Dias *et al.* (2013), a área em estudo situa-se nas sub-bacias de Turcifal e Arruda, no setor central da Bacia Lusitaniana (Figura 1.3). Existem vários estudos que incidem sobre a evolução da Bacia Lusitaniana, porém salienta-se a publicação de Dias *et al.* (2013) por se tratar de uma síntese recente que adota muitos dos modelos e conceitos apresentados em Ribeiro *et al.* (1996), Rocha *et al.* (1996) e Kullberg (2000).

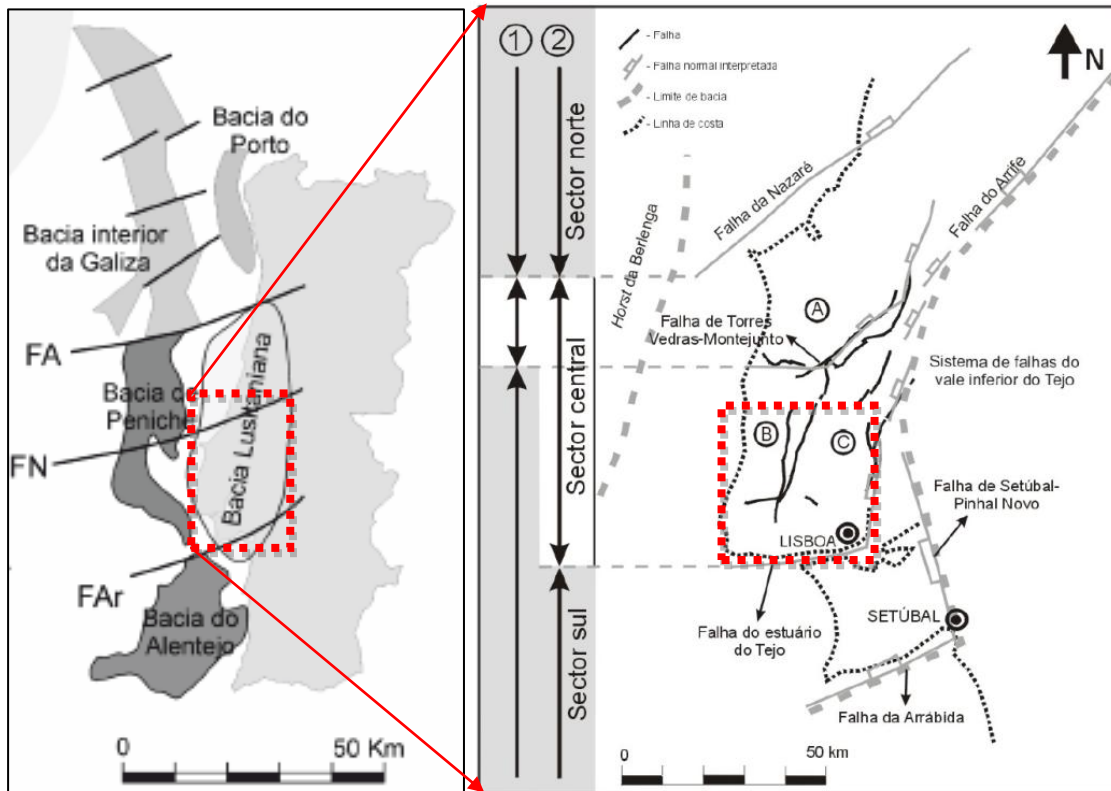


Figura 1.3 - Esquerda: Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitaniana (adaptado de Dias *et al.*, 2013). FA: falha de Aveiro; FN: falha de Nazaré; FAR: falha da Arrábida. **Direita:** Divisão da Bacia Lusitaniana, segundo (1) Rocha e Soares (1984) e (2) Ribeiro *et al.* (1996), em setores e sub-bacias: (A) Bombarral; (B) Turcifal; (C) Arruda. Adaptado de Kullberg (2000) em Kullberg e Machado (2008).

A Bacia Lusitaniana é uma unidade tectono-estratigráfica que se desenvolveu em regime extensivo formada por estiramento crustal durante o Mesozóico, mais concretamente desde o Triásico Médio-Superior até o Aptiano Superior, relacionando-se com a abertura do Atlântico Norte e consequente afastamento entre os continentes norte-americano e euroasiático (Dias *et al.*, 2013). Corresponde a uma bacia sedimentar distensiva que se apresenta alongada aproximadamente na direção N-S e totaliza uma área superior a 20 000 km² (Figura 1.3). Os sedimentos da Bacia Lusitaniana, com espessuras máximas estimadas de 5 km em alguns pontos, depositaram-se principalmente sobre o Maciço Hespérico, que constitui o soco (Figura 1.4).

O desenvolvimento da Bacia Lusitaniana no Mesozóico compreende, de acordo com Dias *et al.* (2013), quatro episódios de *rifting*, após o que terá terminado o regime distensivo (Figura 1.4). A par desta evolução durante o Mesozóico ocorreram processos geodinâmicos episódicos, designadamente diapirismo e magmatismo (Figura 1.5).

No âmbito deste trabalho têm particular importância na área de estudo três eventos magmáticos, pertencentes ao 3º ciclo alcalino da Bacia Lusitaniana (Dias *et al.*, 2013), que tiveram lugar desde o final do Cretácico (Figura 1.5): o Complexo Radial de Mafra (100 Ma) (Ribeiro *et al.*, 1996; SGP, 1955); o Complexo Ígneo de Sintra ou CIS (75-79 Ma) (Terrinha *et al.*, 2003; Kullberg *et al.*, 2006; Dias *et al.*, 2013), designado no presente trabalho como Maciço Sub-Vulcânico de Sintra ou MSVS; o

Complexo Vulcânico de Lisboa ou CVL (72 Ma) (Palacios, 1985; SGP, 1993). Na área de estudo, o CVL está representado principalmente por escoadas basálticas e piroclastos que assentam sobre formações sedimentares do Albiano-Cenomaniano.

Enquanto na sub-bacia de Bombarral, situada a norte da área de estudo, existem numerosos diapiros aflorantes (Figura 1.5), nas sub-bacias de Turcifal e Arruda até agora não têm sido identificados diapiros ou estruturas salinas, o que se deve, segundo diversos autores, à relativa escassez de sal e pequena espessura das formações evaporíticas profundas (p.e. formação de *Dagorda*) (Leinfelder e Wilson, 1998; Alves *et al.*, 2003; Dias *et al.*, 2013).

A partir do Campaniano ocorreu inversão tectónica das estruturas formadas durante a distensão mesozóica na Bacia Lusitaniana, passando esta a estar sujeita a um regime tectónico compressivo. Esta inversão estará relacionada com a rotação da Ibéria no Cretácico terminal-Paleogénico, que provocou a convergência entre a Ibéria e a Eurásia, no contexto da orogenia alpina (Dias *et al.*, 2013). Os eventos compressivos mais relevantes são a compressão Pirenaica, de idade Cretácico terminal-Paleogénico e a compressão Bética, do Miocénico. Carvalho (2003) refere que o regime tectónico generalizadamente compressivo se mantém até à atualidade.

No Eocénico superior-Oligocénico ter-se-á dado início à formação da bacia do Baixo Tejo a sul do setor central da Bacia Lusitaniana. Como refere Moniz (2010) o conjunto sedimentar Cenozóico que constitui a Bacia do Baixo Tejo encontra-se geralmente sub-horizontal a ligeiramente inclinado, embora esteja perturbado junto a alguns acidentes tectónicos. É por isso corrente afirmar-se que na região de Lisboa os terrenos cenozóicos correspondem a um monoclinal.

No Miocénico superior observam-se nalguns locais calcários lacustres, palustres e crostas carbonatadas. Durante o Pliocénico predominou a deposição de areias com intercalações lenticulares de argilas. No Pliocénico superior grande parte da Bacia do Baixo Tejo ficou preenchida por sedimentos (Dias e Pais, 2009). O Quaternário caracteriza-se pela presença de aterros, depósitos de vertente, aluviões, areias e dunas.

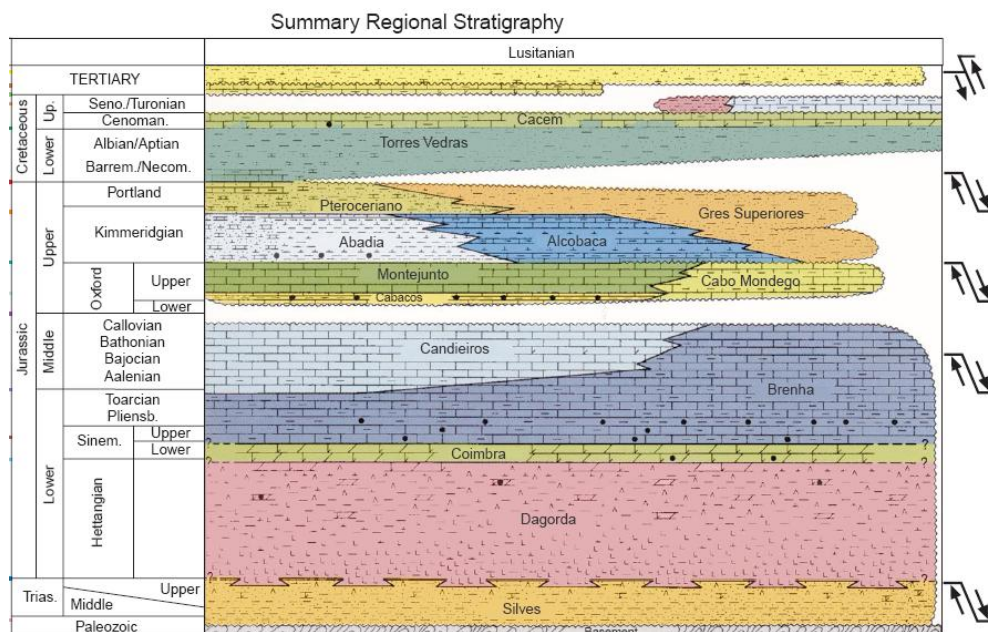


Figura 1.4 - Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Lusitaniana. No lado direito apresentam-se os principais eventos tectónicos observados na região. Fonte: GPEP (1986) em Rasmussen *et al.* (1998).

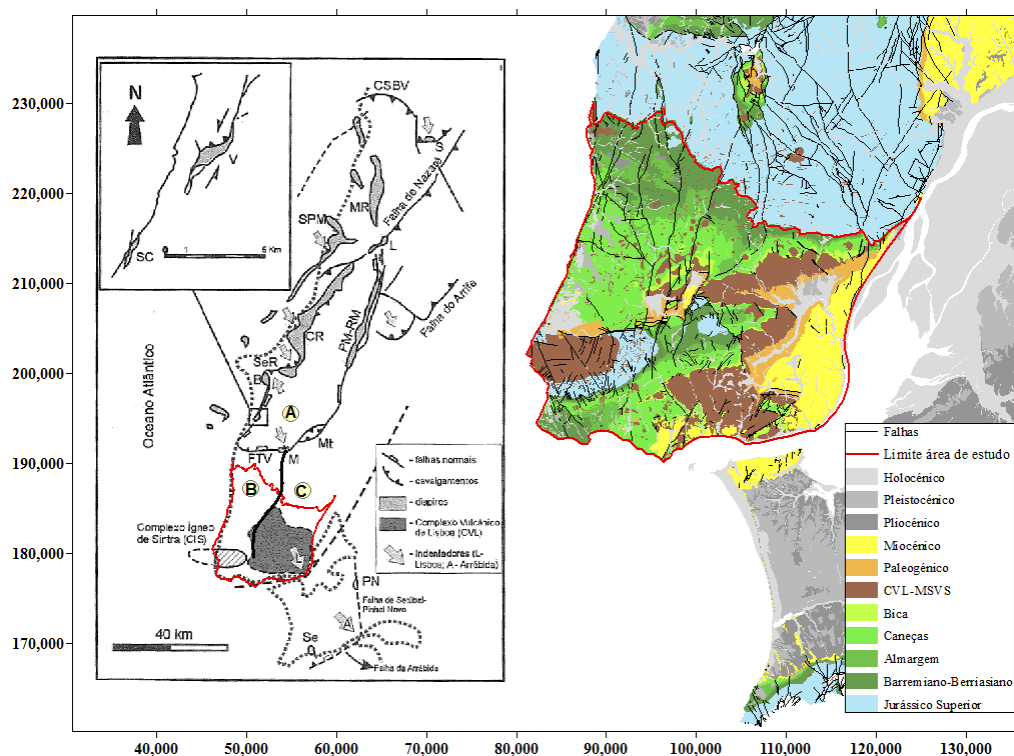


Figura 1.5 - Destaque para o limite da área de estudo, representado a vermelho nas duas imagens. **Esquerda:** Mapa geológico da área de estudo identificando os principais diapiros e os episódios magmáticos de Sintra (CIS) e de Lisboa (CVL) e localização das sub-bacias: (A) Bombarral; (B) Turcifal; (C) Arruda. Modificado de Dias *et al.* (2013). **Direita:** Mapa geológico unificado na escala 1:50 000, com unidades litostratigráficas e falhas. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

1.4. Objetivos e Faseamento dos Trabalhos

A presente tese foi desenvolvida com o objetivo de apresentar uma metodologia de apoio à construção de modelos geológicos tridimensionais (3D), na componente específica da estimação de superfícies representativas do topo e base de unidades litostratigráficas, envolvendo a conciliação de dados de fontes distintas. Concretamente, pretende-se obter uma representação da geometria subsuperficial das unidades litostratigráficas do Cretácico Inferior na região de Lisboa, as mais interessantes, *a priori*, do ponto de vista geotérmico.

Os trabalhos desenvolvidos foram repartidos em 3 fases principais: construção de uma base de dados, processamento de dados e modelação geoestatística. Na Figura 1.6 apresenta-se um fluxograma com o faseamento dos trabalhos, em etapas e sub-etapas.

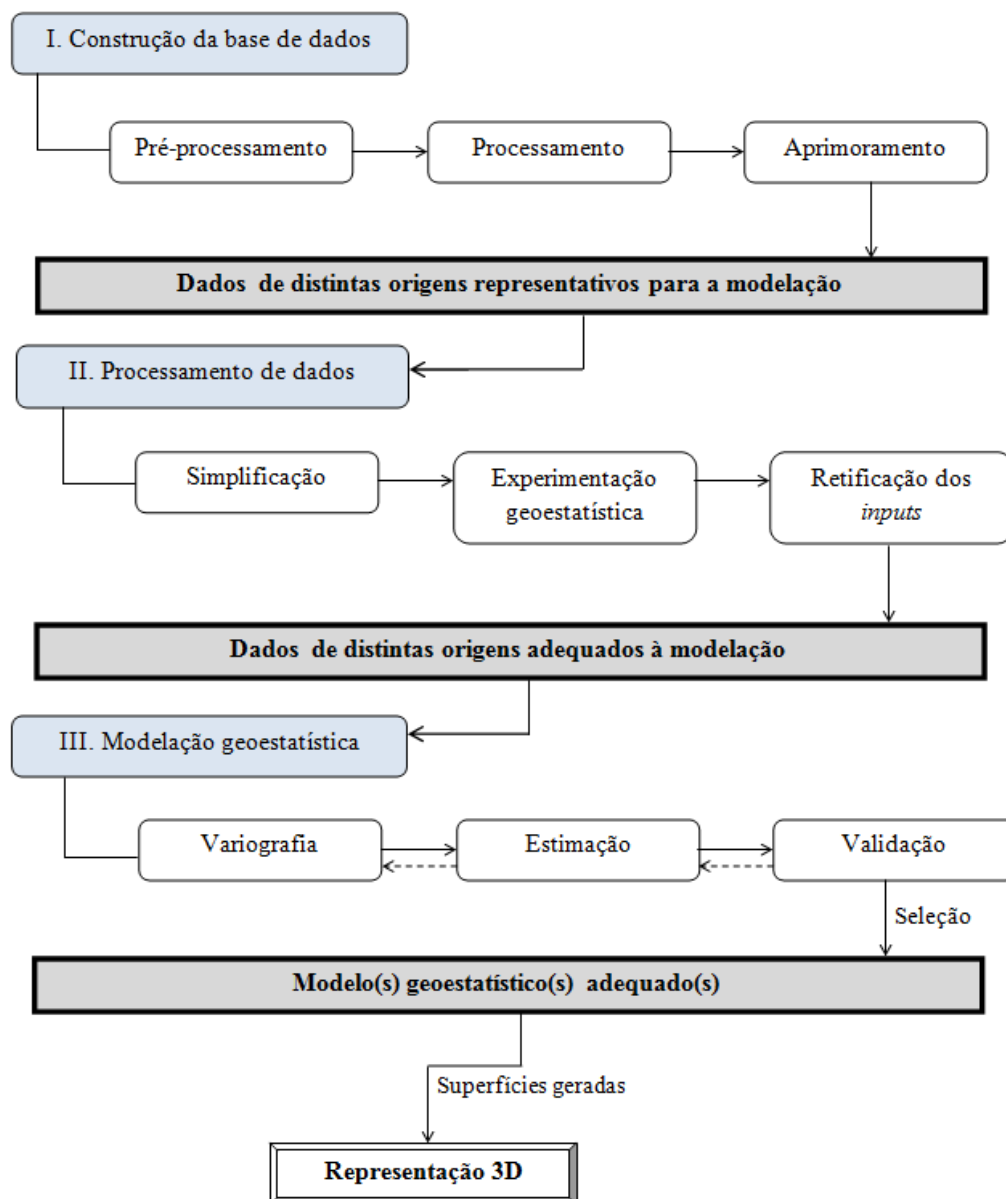


Figura 1.6 - Fluxograma de faseamento dos trabalhos.

A construção da base de dados pressupôs a realização de tarefas de pré-processamento (levantamento e seleção da informação) e de processamento da informação (análise, interpretação e tratamento), em que foram integrados dados de diferentes origens numa única base de dados e foi feito um refinamento ou aprimoramento da mesma.

O processamento de dados incluiu as seguintes sub-etapas: simplificação, em que se consideraram apenas parte dos dados e foi feita uma análise do seu comportamento estatístico e espacial. Seguiu-se uma fase de experimentação geoestatística, que mostrou a necessidade de retificação dos dados de entrada para a modelação geoestatística (eliminação de pontos redundantes e introdução de pontos auxiliares). Foi então possível adaptar a situação de partida às especificidades da modelação geoestatística e do *software* utilizado.

A modelação geoestatística foi estabelecida com base no encadeamento genérico que inclui: variografia, estimação e validação, tendo a estimação sido adaptada consoante os casos em estudo. A sub-etapa de validação permitiu fundamentar a seleção do(s) modelo(s) ou a necessidade de alterar parâmetros anteriormente considerados, consoante o resultado se apresentasse próximo ou distante da realidade conhecida.

Uma vez selecionado o modelo geoestatístico mais adequado à realidade, correspondente ao melhor resultado obtido, ou seja, aceitável do ponto de vista geoestatístico e coerente com o conhecimento pericial da situação em estudo, as superfícies geradas como produto desta fase destinaram-se a ser representadas a 3D.

2. CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

As etapas inerentes à construção da base de dados envolvem duas fases principais, designadas pré-processamento e processamento, e uma fase final de aprimoramento, que de seguida se descrevem.

2.1. Pré-processamento

2.1.1. Levantamento e seleção da informação

A primeira fase do pré-processamento consistiu no levantamento de toda a informação disponível referente ao tema em estudo. Posteriormente, selecionaram-se os dados topográficos, geológicos, hidrogeológicos e geofísicos, da região de Lisboa com informações relevantes para o presente estudo, que se resumem na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Síntese bibliográfica dos dados utilizados.

Fonte	Tipo de dado	Formato	Especificações	Organização detentora
Topografia	Modelo digital de elevação	Digital (matricial)	Modelo digital de elevação global obtido pelo sensor ASTER (<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>), instalado no satélite <i>Terra</i> da NASA	<ul style="list-style-type: none"> Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) do Japão National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Geologia	Cartografia 1: 50 000	Digital (vetorial)	Folhas 34-A, 34-B, 34-C e 34-D da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000: unidades litostratigráficas e estruturas tectónicas	<ul style="list-style-type: none"> Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)
Hidrogeologia	Furos de captação de águas subterrâneas	Analógico (papel)	Relatórios dos furos que constam das folhas militares na escala 1: 25 000: 403; 404; 415; 416; 417; 429; 430; 431; 442	<ul style="list-style-type: none"> LNEG Agência Portuguesa do Ambiente (APA)
Geofísica	Sísmica	Analógico (papel) e digital (vetorial)	Linhas sísmicas: AR12-81; AR16-81; AR17B-81; AR28	<ul style="list-style-type: none"> Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis (ENMC)

2.1.2. Organização e georreferenciação

Na segunda fase do pré-processamento procedeu-se à organização dos dados selecionados anteriormente, numa base de dados georreferenciada e integrada num Sistema de Informação Geográfica (SIG), através da plataforma *ArcGis ESRI*®, com o objetivo de facilitar a sua visualização e o trabalho a desenvolver nas fases seguintes. Tendo em conta que os dados originais que estavam já georeferenciados usavam o sistema de coordenadas da grelha nacional Lisboa Hayford Gauss IGeoE, na presente tese optou-se por manter o dito sistema.

2.2. Processamento: Análise, interpretação e tratamento da informação

2.2.1. Registo das unidades litostratigráficas da área em estudo

O processamento teve início com a recolha de informações das notícias explicativas das folhas 34-A Sintra, 34-B Loures, 34-C Cascais e 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000, relativas à espessura média, litologia e idade das unidades litostratigráficas presentes na área em estudo (ver Anexo 1). Genericamente, do ponto de vista litostratigráfico, existem na área de estudo rochas que datam desde o Triásico até à atualidade, mas constata-se que só afloram depósitos do Jurássico Superior, Cretácico e Cenozóico.

Devido ao vasto número de formações litostratigráficas identificadas na escala 1: 50 000 na área em estudo (Anexo 1), tornando inviável trabalhá-las na totalidade, optou-se na presente tese por simplificar e agrupar em 8 unidades litostratigráficas, que de seguida se descrevem de forma sintética na Tabela 2.2. No Anexo 2 estão incluídas fotografias do aspeto em afloramento de algumas das formações identificadas a seguir obtidas durante duas saídas de campo realizada em maio de 2015 na área de estudo.

Tabela 2.2 - Unidades litostratigráficas selecionadas da área a estudar e siglas das formações consideradas das respetivas folhas da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000 e notícias explicativas. Para maior detalhe, consultar o Anexo 1.

Unidade	Folhas	Siglas
1-Miocénico	34A	$M^3I + M^3m$
	34B e 34D	$M_{Mv} + M_{BP} + M_{CR} + M_{QC} + M_{Xa} + M_{Gr} + M_{Mu} + M_{VC} + M_{Es} + M_{Ec} + M_{FT} + M_{QB} + M_{CV} + M_{Pm} + M_{Pr}$
	34C	$M^e_{III} + M^I_{II} + M^I_I$
2-Paleogénico	34A	\emptyset
	34B e 34D	Φ_{Bf}
	34C	Φ
3-CVL-MSVS	34A e 34C	β^1
	34B e 34D	B
4-Bica	34A e 34C	C^3_C
	34B e 34D	$C^2_{Bi} + C^2_{Fa}$
5-Caneças	34A e 34C	C^2_{AC}
	34B	C^2_{GC}
	34D	C^2_{Cn}
6-Almargem	34A e 34C	$C^1_{AS} + C^1_A + C^1_{Ba}$
	34B	$C^1_{Ro} + C^1_{Cr} + C^1_{Re}$
7-Barremiano-Berriasiano	34A	$C^1_{HBa} + C^1_{Hc} + C^1_{Ht} + C^1_V + C^1_{Be}$
	34B	$C^1_{VL} + C^1_{SC} + C^1_{RR} + C^1_{Se}$
	34C	$C^1_{HBa} + C^1_H + C^1_V + C^1_{Be}$
8-Jurássico Superior	34A, 34B e 34C	$J^3_{Ab} + J^3_{Am} + J^3_{So} + J^3_{Ar} + J^3_{So} + J^3_{Fr}$

Este agrupamento foi realizado em função das unidades **3-CVL-MSVS** e **6-Almargem**, a partir das litologias e da divisão que consta na cartografia geológica na escala 1: 500 000. Ressalva-se que, devido à repetição de sequências litológicas na área de estudo e à existência de formações assíncronas ou variações laterais, poderão existir erros. Assim, a seleção apresentada poderá ser aprimorada no futuro, com a introdução de novos conhecimentos.

Seguidamente expõem-se, em traços gerais, as características das unidades litostratigráficas selecionadas, das mais antigas às mais modernas, baseadas principalmente nas publicações de Kullberg (2000), Rasmussen *et al.* (1998) e Kullberg *et al.* (2013).

A unidade litostratigráfica **8-Jurássico Superior** foi a unidade mais antiga considerada, que agrupa as formações de *Abadia*, *Amaral*, *Freixial*, *Sobral* e *Arranhó*, de idade Kimmeridgiano-Titoniano. Consiste essencialmente num conjunto de calcários, margas, e por vezes, siltitos e arenitos, que atinge espessuras na ordem dos 2000 m. As unidades subjacentes de idade Jurássica, tendo em conta que não foram consideradas para o presente trabalho, não serão descritas.

A seguinte unidade litostratigráfica corresponde à **7-Barremiano-Berriasiano**, e agrupa diversas formações sedimentares dos *Grupos de Torres Vedras* e de *Cascais*, constituídos essencialmente por calcários, margas, arenitos e pelitos de idades compreendidas entre o Titoniano-Berriasiano e o Barremiano Inferior, com uma espessura média de 200 m.

É de salientar que as unidades **7** e **8** apresentam litologias semelhantes, o que conduziu a dificuldades na identificação do limite entre as duas unidades; este obstáculo foi contornado pela observação dos afloramentos da cartografia na escala 1: 50 000 e nas espessuras esperadas (Anexo 1).

A unidade **6-Almargem** corresponde com os *Grés de Almargem* ou *Camadas de Almargem* (Barremiano Superior a Albiano), sendo constituída pelos *Grés Inferiores* ou formação de *Regatão* (Barremiano Superior); *Camadas com orbitolinas* ou formação de *Crismina* (Aptiano); *Grés Superiores* ou formação de *Rodízio* (Albiano). Em geral, esta unidade é uma sequência de arenitos, carbonatos e novamente arenitos que totaliza uma espessura na ordem dos 100 m (SGP, 1993). É importante salientar neste ponto que, tendo em conta a principal aplicação do trabalho a desenvolver na presente tese, i.e. desenvolver uma metodologia para apoiar a construção de um modelo geológico 3D que permita a avaliação do potencial geotérmico na região de Lisboa, a modelação da unidade **6** foi considerada como prioritária, tendo sido consideradas as formações sobre e subjacentes para constranger a sua espessura.

Sequencialmente seguem-se a unidade **5-Caneças** (Albiano a Cenomaniano), composta por calcários, margas e calcários margosos com uma espessura ~300 m, e a unidade **4-Bica** (Cenomaniano Superior) que é facilmente identificável pela sua natureza calcária cristalina com fósseis (rudistas) e cor esbranquiçada, não ultrapassando geralmente os 50 m.

A unidade **3-CVL-MSVS** agrupa os dois episódios magmáticos regionais já referidos (Figura 4), que correspondem com um hiato deposicional no Senoniano. Esta foi considerada um nível-guia que, quando presente, permitiu diferenciar claramente os limites entre o Cenozóico e o Mesozóico, devido à sua litologia de natureza ígnea, que contrasta tanto com as formações sedimentares sobre e subjacentes. A espessura é extremamente variável, podendo atingir desde dezenas até centenas de metros.

Acima da unidade **3** encontra-se a unidade **2-Paleogénico**, que corresponde em geral com a formação de Benfica. Trata-se de um conjunto de arenitos, conglomerados, calcários, argilitos e margas, que podem atingir cerca de 400 m de espessura na zona oriental da área em estudo.

A unidade litostratigráfica mais recente considerada corresponde com o **1-Miocénico**, que agrupa um elevado número de formações, embora com litologias muito semelhantes, favorecido pela frequente ocorrência de fósseis. A natureza destas formações é essencialmente detrítica e carbonatada, ocorrendo calcários, arenitos, calcarenitos, argilitos e margas. Constata-se que na área em estudo a sua espessura aumenta progressivamente de Oeste para Este, desde 12 até 680 m, de acordo com Carvalho *et al.*, 1990.

O Pliocénico e o Quaternário cobrem as formações anteriores, no entanto são praticamente superficiais, apresentando uma espessura bastante reduzida na área de estudo. Deste modo, estas unidades de cobertura constituídas por dunas, areias, aluviões e aterros, não foram consideradas para o desenvolvimento do presente trabalho.

➔ Resultado: 8 unidades litostratigráficas, conforme se apresenta na Tabela 2.2.

2.2.2. Integração dos dados geológicos

2.2.2.1. Cartografia geológica 2D - escala 1: 50 000

Os dados geológicos em formato vetorial das folhas da área de estudo da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000, disponibilizados pelo LNEG, foram analisados, interpretados e tratados recorrendo à plataforma *ArcGis* e a diversas ferramentas automatizadas do *ArcToolbox*. Neste contexto importa mencionar que existem outras ferramentas alternativas às utilizadas, que poderiam conduzir resultados diferentes dos obtidos.

2.2.2.1.1. Discretização das unidades litostratigráficas em pontos

As 8 unidades litostratigráficas selecionadas apresentavam-se unificadas, tendo-se portanto exportado para diferentes polígonos, o que resultou em 8 grupos de polígonos correspondentes com cada unidade; posteriormente converteram-se os referidos polígonos em arcos e, finalmente, discretizaram-se em pontos. A cada ponto assim obtido foram atribuídas as coordenadas x e y do sistema Lisboa Hayford Gauss IGeoE e, por último, foi atribuída a cota (z), i.e. distância vertical entre um ponto e o nível médio do mar, com base no modelo digital de elevação global (Aster GDEM) que tem um *pixel* de dimensão igual ou inferior a 30 m, ou seja, resolução aproximada de 30 m.

2.2.2.1.2. Refinamento dos limites das unidades litostratigráficas

Existem pontos que não correspondem com os limites das unidades litostratigráficas a modelar, quer por pertencerem a outra unidade (caso dos limites com as formações Holocénicas), quer por consistirem em pequenas estruturas (caso dos diques, filões, etc. pertencentes à **3-CVL-MSVS**). Neste sentido foi feito manualmente, com recurso à plataforma *ArcGis*, um refinamento dos limites das unidades litostratigráficas removendo da base de dados georreferenciada estes pontos pouco

representativos, tendo assim resultado 42 669 pontos representativos. A título de exemplo, na Figura 2.1 apresenta-se o aspeto da unidade litostratigráfica **3** antes e depois do seu refinamento. O Anexo 3 expõe o aspeto inicial e final das unidades litostratigráficas mais interessantes para o trabalho (**6** e **7**).

➔ Resultado: base de dados georreferenciada e refinada com coordenadas x , y e z , código (correspondente à litologia-tipo), era, período e época para cada ponto.

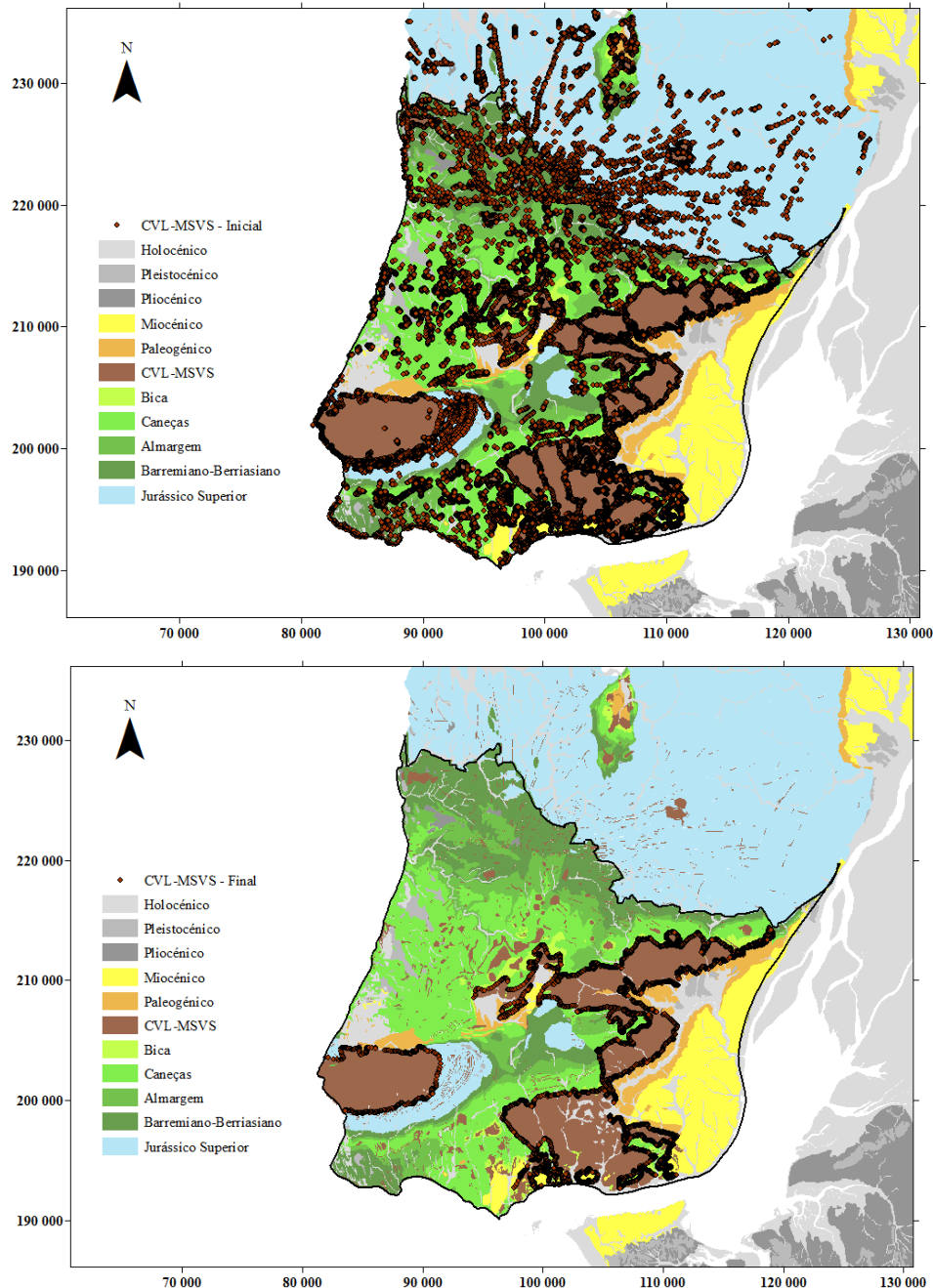


Figura 2.1 - Aspeto da unidade litostratigráfica **3-CVL-MSVS** antes (acima) e depois (baixo) da eliminação dos pontos pouco representativos dos seus limites, obtidos da cartografia geológica. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

2.2.2.1.3. Definição dos tipos de horizontes (limites estratigráficos)

Adicionou-se um campo, designado horizonte, à base de dados georreferenciada que resultou da etapa anterior para identificar que pontos correspondem ao topo e à base de cada unidade litostratigráfica. A codificação atribuída foi 1 para o topo, e 2 para a base.

Nos casos em que, lateralmente, os pontos não correspondem nem ao topo nem à base, mas sim a contactos mecânicos de falhas ou a intrusões magmáticas, repetiu-se o procedimento anterior, assinalando código 3 ou 4, para a primeira ou segunda situações respetivamente (Figura 2.2).

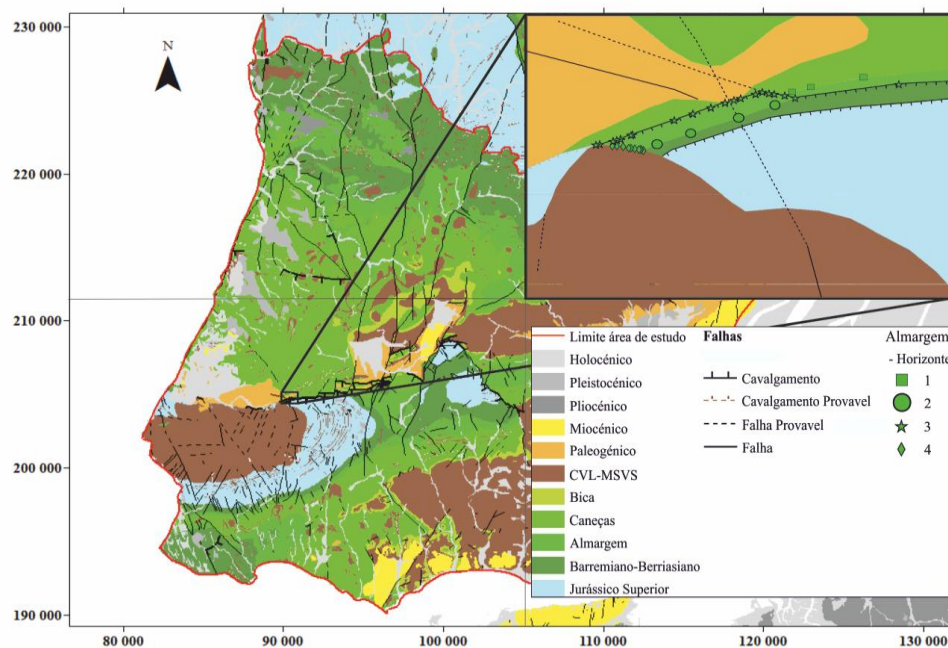


Figura 2.2 - Detalhe do mapa geológico simplificado da área de estudo. Observam-se os pontos que indicam os limites das unidades estratigráficas com a simbologia correspondente aos tipos de horizontes 1-topo, 2-base, 3-falha e 4-intrusivo.

2.2.2.1.4. Controlo de qualidade dos dados

Posteriormente atribuiu-se um parâmetro de qualidade aos resultados obtidos, tendo-se considerado os códigos 1 e 2, correspondentes a qualidade boa e aceitável, respetivamente. Destacar que todos os pontos que correspondem com os limites de falhas e intrusões (horizontes 3 e 4, respetivamente) foram considerados como dados de qualidade 2 ou aceitável, como consequência da maior incerteza associada à sua teórica maior dificuldade para serem definidos no campo.

➔ Resultado: base de dados georreferenciada e refinada com coordenadas *x*, *y* e *z*, *código* (correspondente à litologia-tipo), *era*, *período*, *época*, *horizonte* e *qualidade* dos dados para cada ponto.

2.2.3. Integração dos dados hidrogeológicos

2.2.3.1. Relatórios de furos de captação de águas subterrâneas 1D

Para o presente trabalho foram consultados e analisados mais de 500 relatórios de furos de captação de águas subterrâneas na área de estudo, que se encontram arquivados no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e na Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Após uma revisão crítica de cada relatório, com base no conhecimento geológico e hidrogeológico da área circundante, foram considerados fiáveis e interessantes para o estudo os dados de 251 furos.

Com recurso ao *Microsoft Office Excel*® criou-se uma base de dados relativa à sua referência, localização, objetivo, profundidade, litologias atravessadas, posição dos drenos, parâmetros hidrodinâmicos (nível hidrostático, nível hidrodinâmico, caudal), e parâmetros físico-químicos das águas, quando disponíveis.

Partindo das colunas litológicas nos *logs* dos furos contidos nos respetivos relatórios (exemplo na Figura 2.3), e tendo como suporte o conhecimento geológico (litologias, espessuras, etc.) da área em estudo, nesta fase apresentou-se uma proposta de correspondência entre a litologia atravessada pelos furos e as 8 unidades litostratigráficas selecionadas.

Desta forma identificaram e registaram-se os pontos correspondentes com novos limites (horizontes) das unidades litostratigráficas também nos furos. À semelhança dos pontos obtidos da cartografia geológica, a codificação atribuída foi 1 ou 2 consoante os pontos correspondem ao topo ou à base, respetivamente. Também foram atribuídos os códigos 0.5 e 1.5, correspondentes com a boca e base do furo, denominados "Topo relativo" e "Base mínima". Estes novos horizontes permitem constranger a informação dos furos, mas ressalva-se que não são limites reais.

Neste ponto importa salientar que a correspondência entre a litologia e as unidades litostratigráficas foi acompanhada de dificuldades, sobretudo na atribuição dos limites entre as unidades **6**, **7** e **8** devido às semelhanças litológicas que apresentam. Por outro lado, a presença da unidade **3** permitiu diferenciar com clareza os limites com as unidades sub e sobrejacentes a esta.

Finalmente, também foram considerados diferentes graus de incerteza (qualidade) à proposta de correspondência litológica-estratigráfica que define os limites (horizontes) das unidades em cada furo, atribuindo-lhes os códigos 1, 2 ou 3, correspondentes a qualidade boa, aceitável e inaceitável, respetivamente. Para as fases seguintes só foram considerados os horizontes com qualidade 1 e 2, tendo resultado 693 pontos representativos da área de estudo das 8 unidades litostratigráficas. Na Figura 2.4 apresenta-se a localização dos referidos pontos.

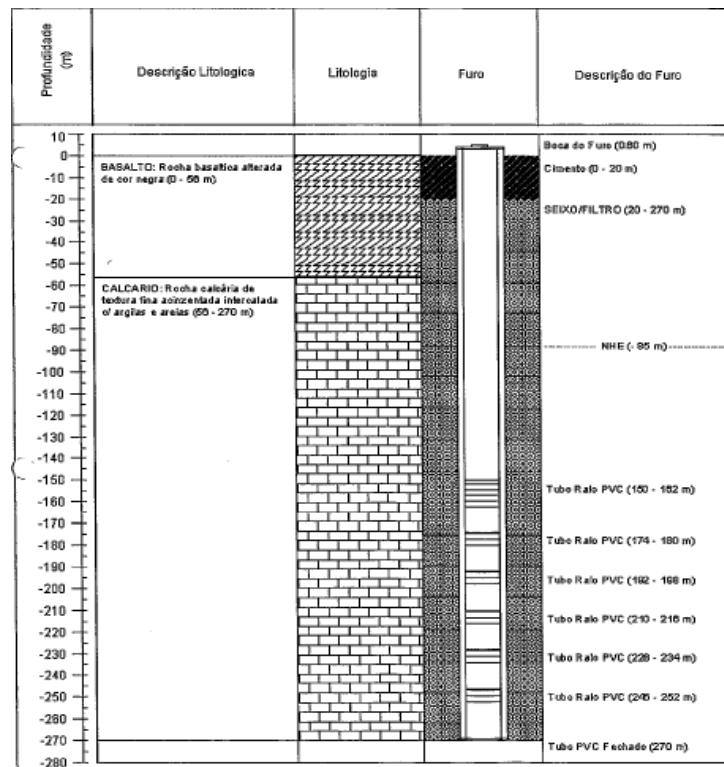


Figura 2.3 - Coluna litológica do furo de captação de águas subterrâneas LM85, extrato do relatório de execução, no qual se indicam a profundidade respeito da superfície, as litologias atravessadas, a posição dos drenos (tubos ralos) e o nível hidroestático (NHE) observado antes da realização do ensaio de bombeamento.

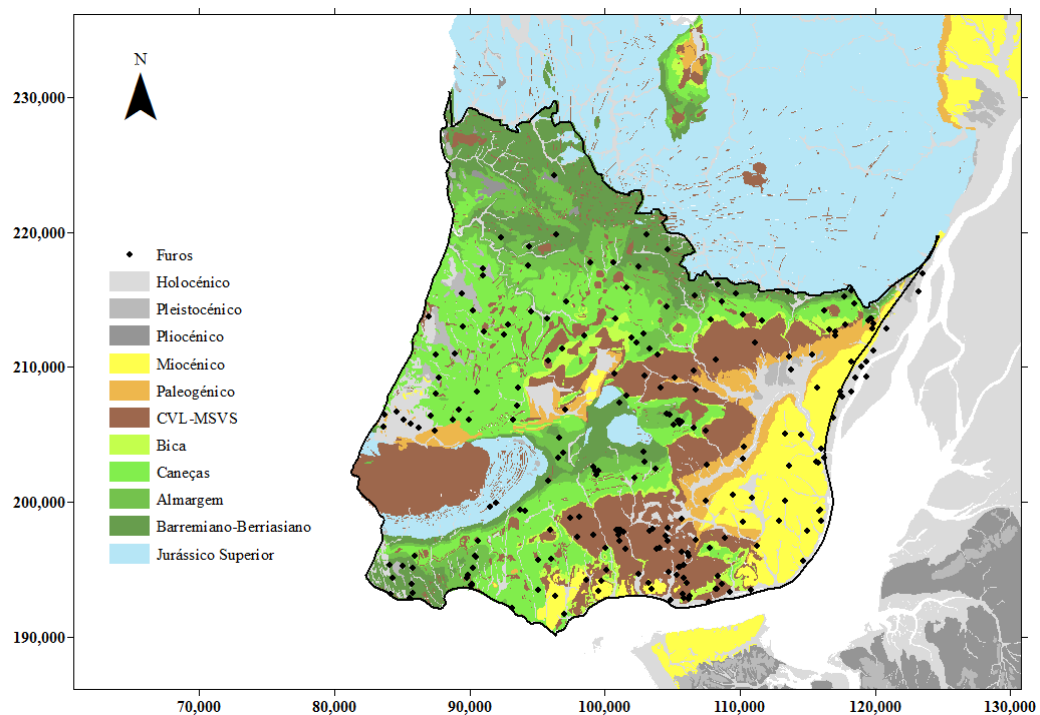


Figura 2.4 - Localização dos furos considerados para a modelação na área em estudo. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

2.2.4. Integração dos dados geofísicos 2D

Nesta fase foram integrados na base de dados georreferenciada a informação de 4 perfis sísmicos de reflexão, realizados para pesquisa de hidrocarbonetos na zona norte da área de estudo (localização das correspondentes linhas sísmicas na Figura 2.5) pela empresa Veritas em 1963 (AR-28) e pela empresa Petróleos de Portugal (Petrogal) em 1981 (AR12-81, AR16-81 e AR17B-81). As coordenadas dos *shot-points* das linhas sísmicas e as imagens migradas dos respetivos perfis sísmicos foram cedidas gentilmente pela Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis (ENMC) em formato digital especificamente para a presente tese.

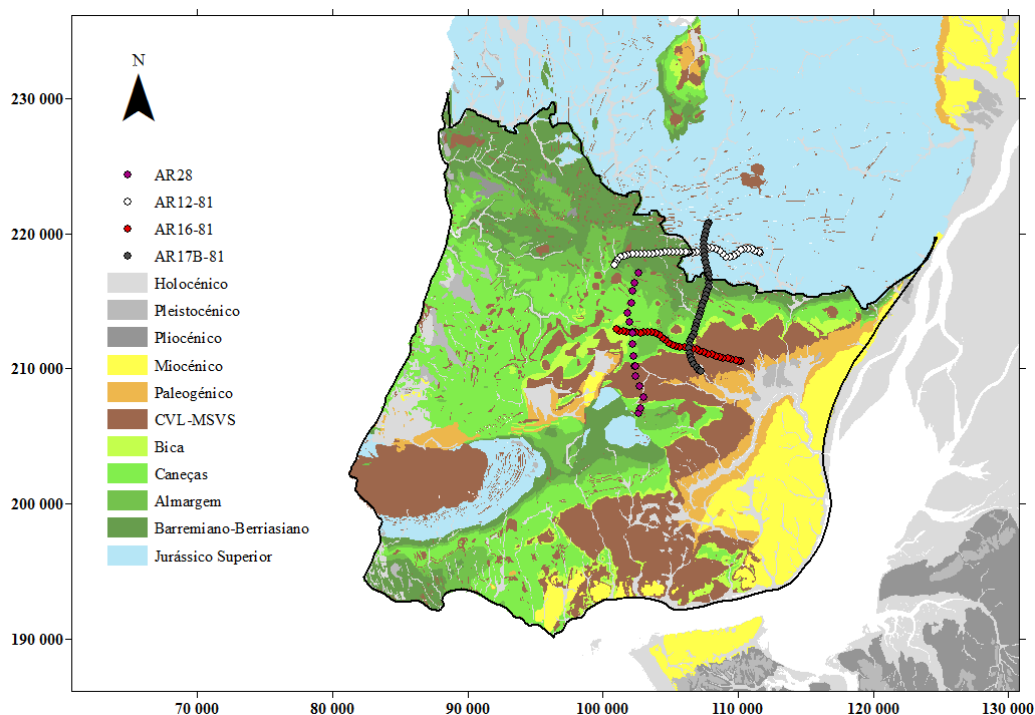


Figura 2.5 - Localização das linhas sísmicas na área em estudo. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

2.2.4.1. Análise das linhas sísmicas

A análise consistiu no registo das interseções entre cada linha sísmica e contactos geológicos, falhas, furos de captação de águas subterrâneas e das interseções com outras linhas sísmicas existentes na mesma zona e que já tinham sido reprocessadas previamente por Carvalho (2003), conhecendo o espaçamento entre um determinado par de geofones (i.e., pontos recetores dos sinais sísmicos à superfície).

2.2.4.2. Análise dos perfis sísmicos de reflexão

Na análise dos perfis sísmicos é essencial, em primeiro lugar, ter em conta a sua resolução (R), o que na teoria corresponde à distância mínima entre dois objetos, de tal forma que estes possam ser

distinguidos. A resolução deriva do comprimento de onda (λ), que é por definição o quociente entre a velocidade (v) e a frequência (f) (Equação 1):

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Equação 1 - Comprimento das ondas sísmicas, em função da velocidade e frequência.

No entanto, as camadas geológicas próximas são geralmente diferenciadas se tiverem uma espessura mínima correspondente a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ), daí que a resolução vertical (R) seja determinada pela Equação 2:

$$R = \frac{\lambda}{4}$$

Equação 2 - Resolução vertical dos perfis sísmicos, em função do comprimento de onda.

Com base nestas equações, bem como considerando que a velocidade é de 2500 m/s (correspondente à velocidade de homogeneização referida nos perfis considerados) e que a frequência é de 10 Hz, determinou-se que a resolução vertical dos perfis sísmicos de reflexão analisados é aproximadamente 60 m.

2.2.4.3. Identificação do horizonte (limite estratigráfico) topo no perfil sísmico de reflexão

É expectável que o registo sísmico entre as várias unidades litostratigráficas seja diferente, observando-se geralmente um forte horizonte refletor na separação entre duas unidades distintas do ponto de vista litológico. No entanto, a informação dos refletores nem sempre é evidente; para complementar e calibrar essa informação registou-se, nos perfis sísmicos, o horizonte topo das várias unidades litostratigráficas atribuído nas etapas anteriores através dos furos de captação de águas subterrâneas que intersejam ou se encontram próximos das linhas sísmicas.

Esta tarefa pressupõe a conversão das profundidades dos horizontes nos furos em tempos, uma vez que a escala vertical dos perfis sísmicos corresponde ao tempo de viagem das ondas de reflexão (na realidade o tempo é duplo, uma vez que compreende os dois sentidos da propagação da onda no subsolo) tendo para tal sido utilizada uma expressão que relaciona o tempo (t) com a profundidade (z), conhecendo a velocidade (v) de propagação das ondas na rocha (Equação 3):

$$t = \frac{2 \times z}{v}$$

Equação 3 - Tempo de viagem (ida e volta ou *two-way-time*) das ondas sísmicas de reflexão, em função da profundidade e velocidade.

A velocidade difere consoante a rocha e profundidade atravessadas, o que torna a transformação das profundidades em tempos uma tarefa complexa. Efetivamente, o conhecimento das velocidades só poderia ser rigoroso caso fossem analisadas diagrfias com registo das velocidades nos furos, ou em alternativa *check-shots*, o que não foi possível por não existirem. O critério adotado para contornar esta limitação foi considerar que acima dos 0 ms (correspondentes a aproximadamente 150 m de profundidade) a velocidade é dada pela velocidade de homogeneização (2500 m/s) e abaixo dos 0 ms a velocidade é atribuída de acordo com as velocidades obtidas no trabalho de Carvalho *et al.* (2005) e no projeto MILUPOBAS (Lomholt *et al.*, 1995), tendo-se considerado os seguintes valores médios:

- 3000 m/s para as unidades do Cretácico (i.e., 5-Caneças, 6-Almargem e 7-Barremiano-Berriasiano);
- 3500 m/s para as unidades do Jurássico Superior (i.e., 8-Freixial/Sobral/Arranhó e 9-Abadia);
- 5200 m/s para a unidade do Jurássico Médio (10-Montejunto);
- 5500 m/s para a unidade do Jurássico Inferior (11-Hettangiano).

Deste modo, em cada perfil sísmico apresentou-se uma proposta de identificação dos horizontes topo das várias unidades litostratigráficas, à exceção da 4-Bica devido à reduzida espessura que apresenta (na ordem dos 50 m, ver Anexo 1), não sendo expectável distingui-la com a resolução vertical determinada nos perfis (60 m).

Note-se que, embora na presente tese a unidade mais profunda considerada é o 8-Jurássico Superior, que corresponde na zona de estudo com o topo do horizonte sísmico Freixial/Sobral/Arranhó, para melhorar a identificação e constrangimento das unidades litostratigráficas na interpretação dos perfis sísmicos também foram considerados horizontes que não têm correspondência com as unidades litostratigráficas em estudo (Tabela 2.2), designadamente os mais profundos (i.e. 9-Abadia, 10-Montejunto, 11-Hettangiano).

Além disso, realizou-se também uma interpretação estrutural preliminar, tendo-se identificado várias falhas prováveis, algumas sem correspondência superficial na cartografia geológica à escala 1: 50 000 da zona de estudo. Na Figura 2.6 apresenta-se como exemplo a proposta de interpretação do perfil sísmico da linha AR16-81 para a presente tese.

Finalmente, identificados os traçados dos horizontes topo em pontos de localização conhecida, coincidentes aproximadamente com os *shot-points* que estão espaçados a 30 m (correspondentes com a resolução horizontal), transformaram-se os tempos em profundidades, novamente de acordo com a Equação 3, tendo-se assim obtido 144 pontos representativos das diferentes unidades litostratigráficas consideradas.

➔ Resultado: base de dados georreferenciada e refinada com coordenadas x, y e z, código (correspondente à litologia-tipo), era, período, época, horizonte e qualidade dos dados para cada ponto.

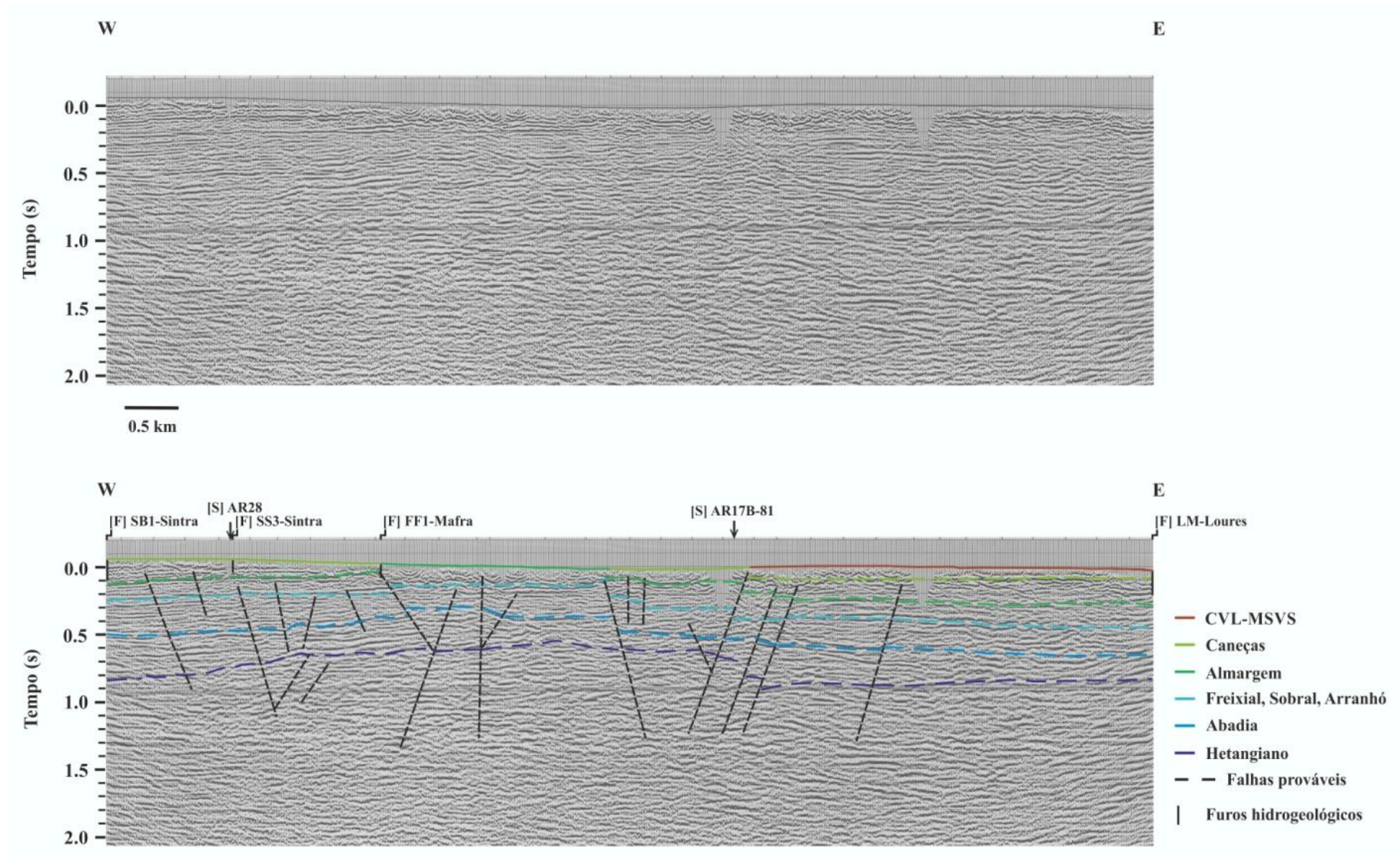


Figura 2.6 - Aspeto do perfil sísmico da linha AR16-81 com o horizonte topo das unidades litostratigráficas e falhas prováveis interpretados.

2.3. Aprimoramento da base de dados

A última tarefa do processamento consistiu no aprimoramento da base de dados georreferenciada e refinada que contém diversos elementos geológicos (cartografia na escalas 1: 50 000), hidrogeológicos (furos de captação de águas subterrâneas) e geofísicos (sísmica de reflexão). Para isso optou-se por abreviá-la, criando um único ficheiro com recurso ao *Microsoft Office Excel*®. Cada ponto com origem nas referidas fontes tem associadas coordenadas de x , y e z , unidade litostratigráfica (Tabela 2.2 e Anexo 1), horizonte (topo, base, topo relativo, base mínima, falha ou intrusivo) e qualidade (boa ou aceitável).

Na Tabela 2.3 apresenta-se uma síntese da base de dados em que se evidencia, para cada fonte, o objetivo e número de pontos resultantes associados.

Tabela 2.3 - Síntese da base de dados.

Fonte	Tipo de dado	Objetivo	Número de pontos
Topografia	Modelo digital de elevação	Atribuição de cotas (coordenadas z)	-
Geologia	Cartografia geológica (escala 1:50 000)	Modelação 3D	42 669
Hidrogeologia	Furos de captação de águas subterrâneas	Modelação 3D	693
Geofísica	Sísmica de reflexão	Modelação 3D	144

A informação de base é o potencial *input* para as fases seguintes, sendo constituída por 43 506 pontos, que têm origem nas diversas fontes consideradas.

A cartografia geológica na escala 1: 50 000 assume um papel determinante na modelação, destacando-se das restantes fontes uma vez que contém a maior percentagem de pontos (42 669). A sísmica de reflexão, embora tenha o menor número de pontos, é essencial para a modelação uma vez que permite introduzir e complementar informação em profundidades significativas.

3. PROCESSAMENTO DE DADOS

A base de dados obtida na fase anterior constitui por si o potencial *input* para a construção de um modelo geológico tridimensional (3D). Diversos ensaios de desenho pericial realizados a 3D evidenciaram, contudo, a necessidade de se proceder a aferições de modo a facilitar a modelação geoestatística de superfícies representativas da situação em estudo.

Neste sentido, a base de dados foi alvo de simplificação, bem como de análise do comportamento estatístico e espacial. Posteriormente, foi utilizada numa abordagem iterativa e sequencial de experimentação geoestatística, em que a análise dos resultados mostrou a indubitável necessidade de se retificar os *inputs* utilizados. Assim, procedeu-se à eliminação de pontos redundantes e à introdução de novos pontos, definidos e estabelecidos especialmente com de acordo com o conhecimento pericial da situação em estudo.

Atendendo às fases subsequentes a desenvolver no trabalho, foi definida uma janela de modelação, que se apresenta na Figura 3.1. Esta abrange 858.4 km², enquanto a área inicial de estudo era de 960 km².

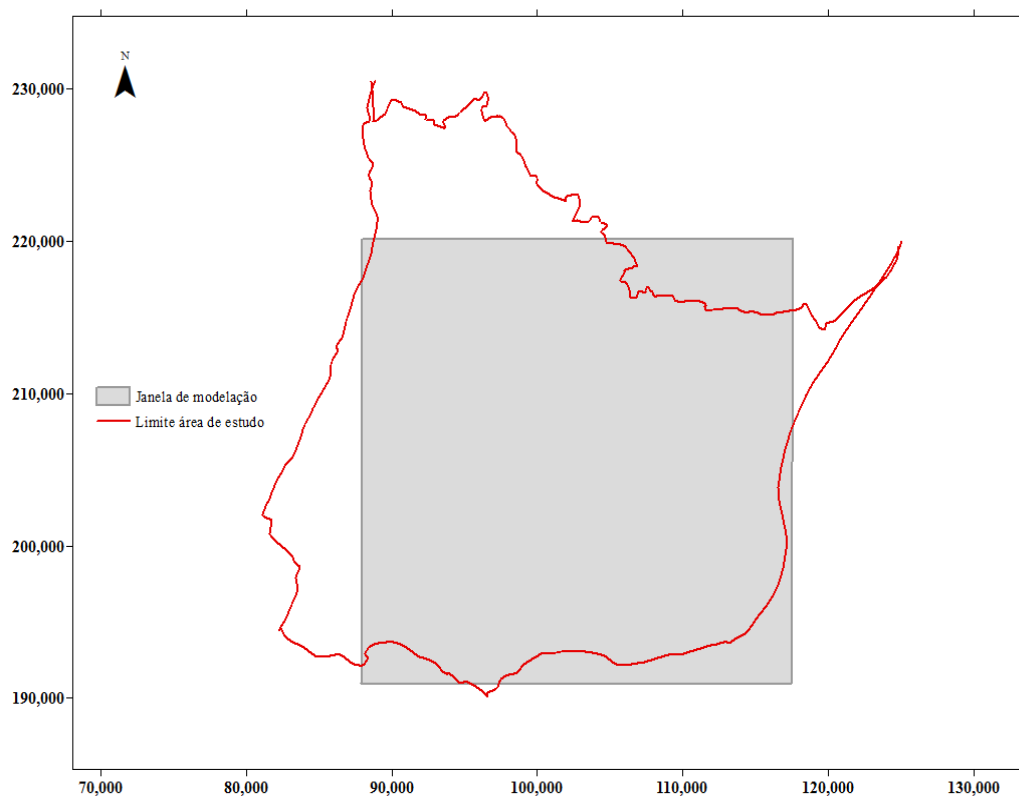


Figura 3.1 - Localização da janela de modelação na área em estudo.

3.1. Simplificação

Como já foi referido, a unidade litostratigráfica **6-Almargem** é a que apresenta maior interesse para o presente trabalho, atendendo ao seu potencial geotérmico. Deste modo, pretendeu-se modelar a referida unidade, considerando o seu horizonte topo e o da unidade imediatamente subjacente na

sequência estratigráfica (**7-Barremiano-Berriasiano**). A simplificação da base de dados passou então pela consideração de um conjunto de pontos representativos dos horizontes do topo das unidades **6** e **7**, aos quais estão associadas as coordenadas x , y , z . A coordenada z é a cota e foi considerada como a variável regionalizável, $Z(x)$, sendo, portanto, a variável modelada. Os dados respeitantes a esta variável foram obtidos com base no modelo digital de elevação global (Aster GDEM).

Os pontos foram obtidos a partir de diversas fontes, o que conduziu à realização de diferentes tarefas já anteriormente descritas, nas sub-etapas respeitantes à construção da base de dados. Nomeadamente, foi efetuado o tratamento da informação dos afloramentos rochosos da Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000 e realizou-se a interpretação de *logs* de furos de captação de águas subterrâneas e de perfis sísmicos de reflexão.

Por si só, o facto de as fontes serem distintas acarreta que as escalas, espaçamentos e malhas de pontos apresentem diferenças consideráveis, o que na prática se traduz em desproporção na densidade, assim como na distribuição espacial dos pontos. Além disso, é também expectável que as medidas estatísticas variem bastante com as fontes consideradas.

3.1.1. Análise do comportamento estatístico dos dados

Como já foi abordado, os dados utilizados correspondem a pontos representativos do topo das unidades **6** e **7** que têm origem em:

- Cartografia geológica na escala 1: 50 000, a partir de agora designada *Cartografia detalhada*;
- Interpretação de furos de captação de águas subterrâneas, denominados *Furos*;
- Interpretação de perfis sísmicos de reflexão ou, simplesmente, *Sísmica*.

Nesta fase foi elaborada uma análise univariada preliminar destes dados com o intuito de conhecer o seu comportamento estatístico, tendo-se considerado o número total, ou seja, densidade de pontos, assim como o mínimo, o máximo, a média, a variância e o desvio padrão associados.

Tabela 3.1 - Análise univariada preliminar dos dados² do topo da unidade 6.

Unidade 6 – Almargem						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Cartografia detalhada</i>	2534	0.0	397.0	177.3	6781.0	82.4
<i>Furos</i>	83	-1174.0	322.0	15.1	47 876.7	218.8
<i>Sísmica</i>	32	-314.0	219.0	-42.6	31 062.7	176.3

² m a.n.m. significa metros acima do nível do mar.

No caso da unidade **6**, os valores de cota variam consoante a fonte considerada: 0 e 397 m na *Cartografia detalhada*, -1174 e 322 m nos *Furos*, -314 e 219 m na *Sísmica*.

Através desta análise tornou-se evidente a disparidade entre a densidade de pontos obtidos da *Cartografia detalhada* (2534) e os das restantes fontes (83 e 32, para os *Furos* e *Sísmica*). Igualmente, a média difere bastante nas fontes consideradas, apresentando um valor negativo na *Sísmica* e valores positivos tanto nos *Furos*, como na *Cartografia detalhada*.

Em relação à variância, constatou-se que esta regista um valor inferior numa escala regional, ou seja, na *Cartografia detalhada*, em comparação com a escala local expressa pelos *Furos* e *Sísmica*. Os valores que mais se aproximam da média são, portanto, os da *Cartografia detalhada*, que têm um desvio padrão na ordem dos 82 m, contrastando com os 219 m dos *Furos*.

Salienta-se que os dados de base da unidade **6** apresentam um comportamento estatístico distinto, no sentido que tanto a densidade de amostras, como as medidas estatísticas analisadas apresentam distintos valores em escalas diferentes.

Tabela 3.2 - Análise univariada preliminar dos dados do topo da unidade 7.

Unidade 7 - Barremiano-Berriasiano						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Cartografia detalhada</i>	3363	0.0	400	147.1	6921.4	83.2
<i>Furos</i>	58	-433.0	312.0	169.1	28 595.6	169.1
<i>Sísmica</i>	17	61.0	320.0	180.9	6525.0	80.8

Na unidade **7** os valores de cota estão compreendidos entre: 0 e 400 m na *Cartografia detalhada*, -433 e 312 m nos *Furos*, 61 e 320 m na *Sísmica*.

Tal como no caso anterior, também a unidade **7** mostrou disparidade entre a densidade de pontos obtidos da *Cartografia detalhada* (3363) e os das restantes fontes (58 e 17, para os *Furos* e *Sísmica*). Em relação à média, todas as fontes apresentam valores na mesma ordem de grandeza, das centenas de metros.

A variância difere consoante as fontes consideradas, sendo superior nos *Furos* e inferior na *Sísmica*. Os valores que mais se afastam da média são, portanto, os dos furos, que têm um desvio padrão de aproximadamente 169 m.

Pode-se, então, afirmar que os dados de base da unidade **7** têm um comportamento estatístico distinto em termos de densidade de amostras e medidas estatísticas.

3.1.2. Análise do comportamento espacial dos dados

A análise do comportamento espacial dos dados foi realizada comparando a densidade e a distribuição espacial de pontos entre as duas unidades de interesse, como se apresenta na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Comparação e diferenças no total de pontos entre as unidades 6 e 7, em função da fonte.

Fonte	Total de pontos (densidade)		Diferença	Diferença(%)
	Unidade 6	Unidade 7		
<i>Cartografia detalhada</i>	2534	3363	829	14
<i>Furos</i>	83	58	25	18
<i>Sísmica</i>	32	17	15	31

Comparando o total de pontos entre as duas unidades constata-se que as diferenças na *Cartografia detalhada*, *Furos* e *Sísmica* são, respectivamente, 829, 25 e 15 pontos, ou seja 14%, 18% e 31%.

Apresentam-se, de seguida, imagens com a distribuição espacial dos pontos de cada fonte, para ambas as unidades (Figuras 3.2 a 3.4). Desta forma, é possível confirmar visualmente como a densidade de pontos com informação superficial, ou seja, que têm origem na cartografia geológica na escala 1: 50 000, é claramente superior à dos restantes pontos.

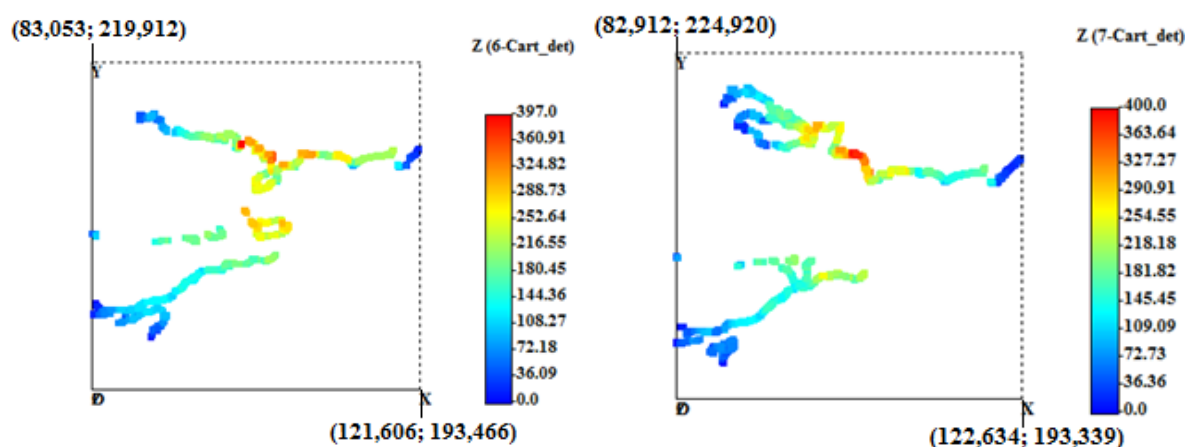


Figura 3.2 - Distribuição espacial dos pontos da *Cartografia detalhada* nas unidades 6 (esquerda) e 7 (direita).

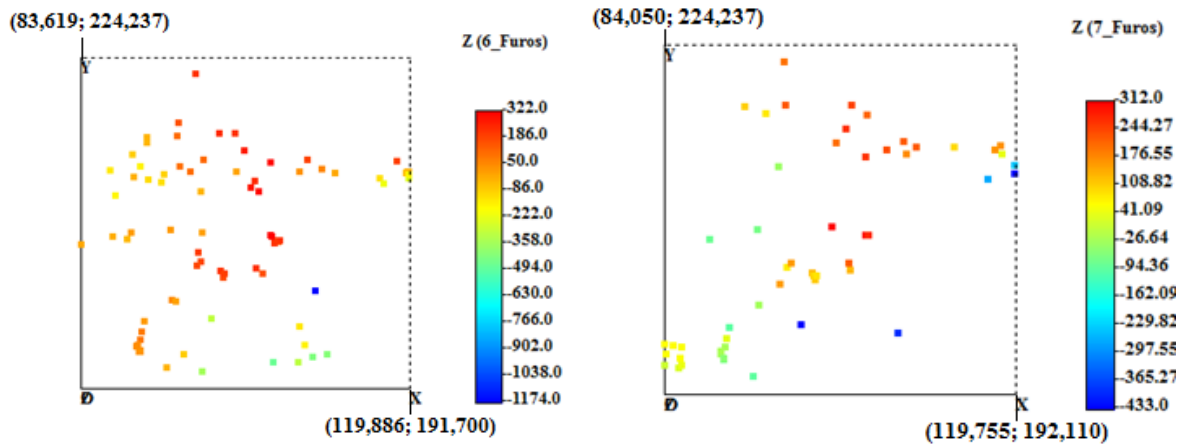


Figura 3.3 - Distribuição espacial dos pontos dos *Furos* nas unidades 6 (esquerda) e 7 (direita).

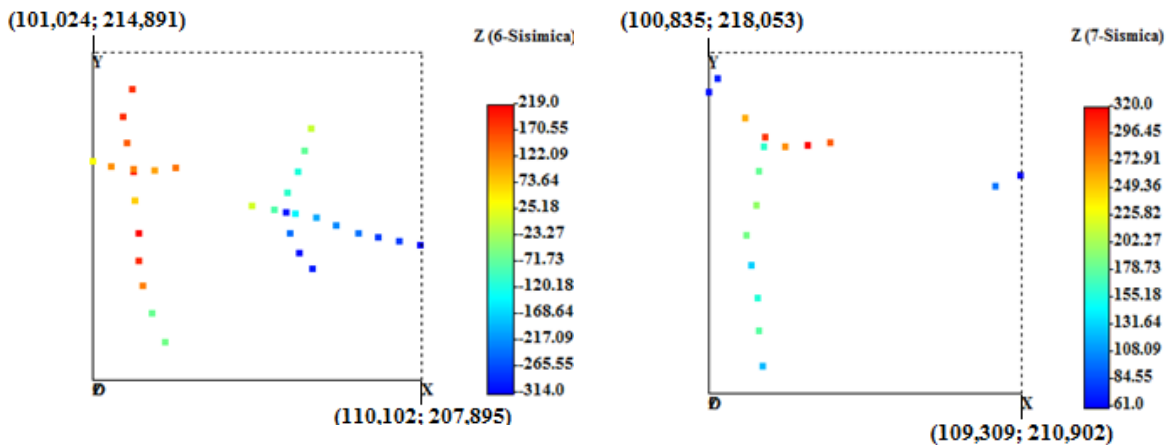


Figura 3.4 - Distribuição espacial dos pontos da *Sísmica* nas unidades 6 (esquerda) e 7 (direita).

3.2. Retificação dos inputs

3.2.1. Eliminação de pontos

Uma verificação pormenorizada da distribuição espacial mostrou a existência de sobreposições nos pontos da *Cartografia detalhada*; ademais, o facto de coexistirem três fontes distintas de dados resultou, numa fase inicial da modelação, em vários artifícios que perturbam a interpretação. Tais sobreposições estão relacionadas com os automatismos que foram utilizados na obtenção dos referidos pontos (Ver subcapítulo 2.2.2.1.1). Esta situação foi corrigida, como se explicará seguidamente.

Importa também referir que os pontos da cartografia, só apresentando valores de cota positivos, contrastavam com os pontos obtidos da interpretação dos furos e dos perfis sísmicos, que têm informação subsuperficial e, consequentemente, valores de cota positivos e negativos (Figuras 3.2 a 3.4).

Capítulo 3

Por estas razões, assim como considerando os diversos resultados que foram sendo alcançados por via da análise iterativa e sequencial de modelação geoestatística, optou-se por abreviar a informação da cartografia dos topos das unidades litostratigráficas de interesse, tendo-se eliminado os pontos que espacialmente distam até 50 m, bem como considerar apenas parte dos pontos, o que resultou nos ficheiros designados por *Cartografia simplificada*. Apresenta-se, de seguida, uma análise univariada preliminar destes dados (Tabelas 3.4 e 3.5) e a sua distribuição espacial (Figura 3.5).

Tabela 3.4 - Análise univariada preliminar da *Cartografia simplificada* na unidade 6.

Unidade 6 - Almargem						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Cartografia simplificada</i>	56	20.0	358.0	209.2	6071.4	77.9

Tabela 3.5 - Análise univariada preliminar da *Cartografia simplificada* na unidade 7.

Unidade 7 - Barremiano-Berriasiano						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Cartografia simplificada</i>	53	0.0	386.0	175.9	8098.9	90.0

Através desta análise verificou-se que, para os pontos da *Cartografia simplificada*, os valores da unidade 6 apresentam uma média de 209 m e variância de 6071 m², enquanto na unidade 7 a média é de 176 m e a variância 8099 m². Salienta-se que, em termos de densidade, a diferença entre as duas unidades é de apenas 3 pontos.

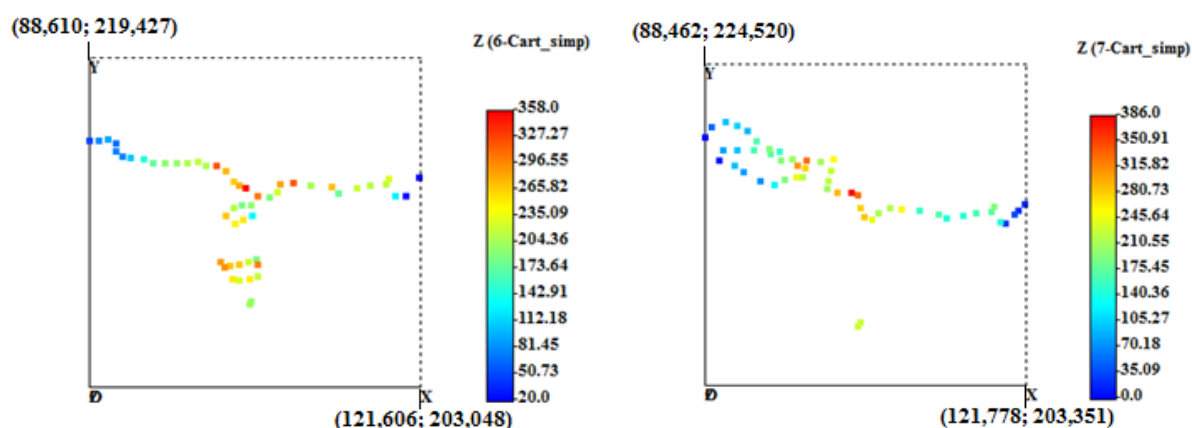


Figura 3.5 - Distribuição espacial dos pontos da *Cartografia simplificada* nas unidades 6 (esquerda) e 7 (direita).

3.2.2. Introdução de novos pontos

Analisando globalmente a área em estudo constatou-se que o setor oriental é o mais interessante para o objetivo proposto, i.e. estimar superfícies correspondentes a unidades relevantes do ponto de vista geotérmico, uma vez que neste setor a unidade **6** se apresenta mais profunda, estando-lhe assim associado um maior potencial geotérmico, com temperaturas tendencialmente tanto maiores quanto maior a profundidade. Assim, o setor oriental passou a ser o principal foco do presente trabalho.

No setor oriental a informação relativa às unidades litostratigráficas de interesse é muito limitada, o que levou a erros grosseiros na fase inicial da modelação geoestatística, como por exemplo o de unidades mais antigas na sequência estratigráfica surgirem acima de unidades mais recentes, caso que se verificou entre a unidade **6** e **7**, em que a **7** tinha em diversos locais valores de cota superiores aos resultantes das malhas de estimação da unidade **6**.

O mesmo aconteceu quando se confrontou um resultado da modelação com dados geofísicos que foram obtidos no trabalho de Carvalho (2003) relativos à base do Cenozóico, correspondentes ao topo do Mesozóico - Cretácico Superior, em que a unidade **6**, de idade Cretácico Inferior, se sobrepunha aos referidos dados.

Para contornar este obstáculo, conhecendo as espessuras esperadas (Anexo 1) das unidades litostratigráficas sobrejacentes (**3-CVL-MSVS**, **4-Bica**, e **5-Caneças**), procedeu-se a uma estimativa da cota do topo da unidade **6**, em locais próximos dos dados geofísicos obtidos por Carvalho (2003) e em que não existe informação na base de dados da presente tese.

Além disso, analisaram-se cuidadosamente os escassos dados referentes à informação em profundidade, que no setor oriental provêm apenas de alguns furos. No entanto, destaca-se o furo do projeto de aproveitamento geotérmico do Hospital da Força Aérea, no Lumiar (AC1-BALUM), por atingir quase 1500 m de profundidade e interseccionar o topo de Almargem a uma cota de -1174 m. Esta informação foi complementada com a interpretação dos cortes das cartas geológicas nas escalas 1: 50 000 e 1: 10 000 da zona de Lisboa (SGP, 1986), que permitiu estabelecer alinhamentos de cotas para as unidades de interesse. A localização do furo AC1-BALUM e dos cortes geológicos analisados encontra-se na Figura 3.6.

Os pontos conhecidos e o conhecimento pericial da situação em estudo permitiram adicionar uma rede auxiliar de dados, designada por *Pontos de Controlo*, que representa os valores expectáveis para a cota dos topos das unidades de interesse. Os *Pontos de Controlo* (distribuição espacial na Figura 3.7) têm a função de controlar e constranger as possíveis soluções de modelação, impondo valores de $Z(x)$ para colmatar a falta de dados, que é particularmente notória no setor oriental da área em estudo, permitindo uma aproximação coerente entre os resultados de modelação e a realidade.

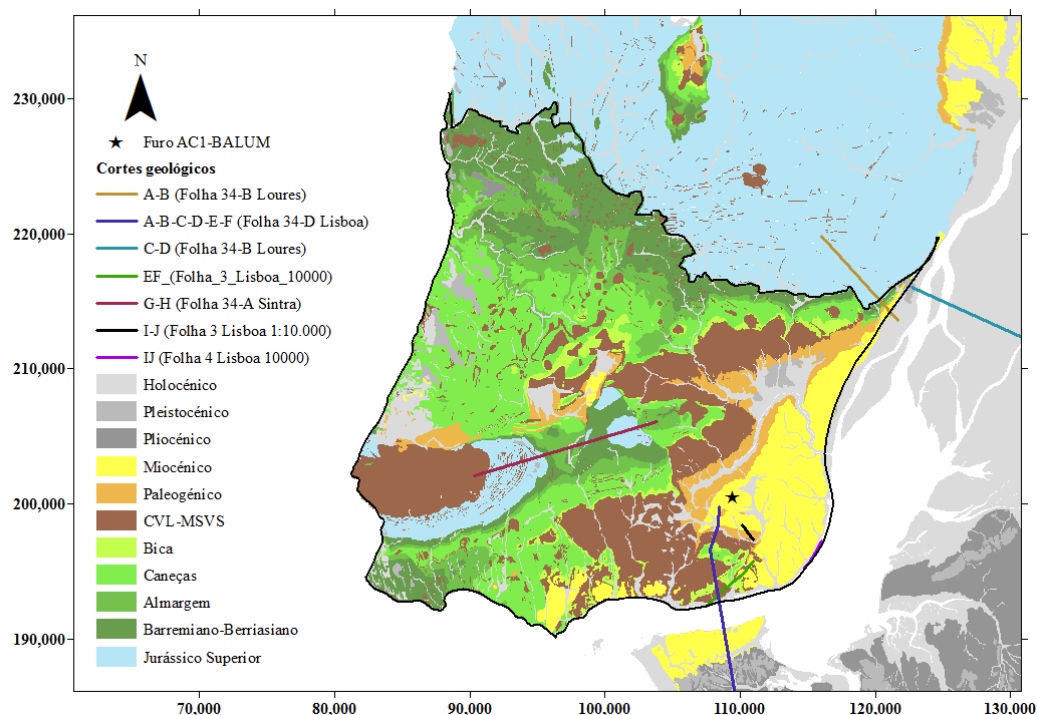


Figura 3.6 - Localização do furo AC1-BALUM e dos cortes geológicos considerados para complementar a informação no setor oriental da área em estudo.

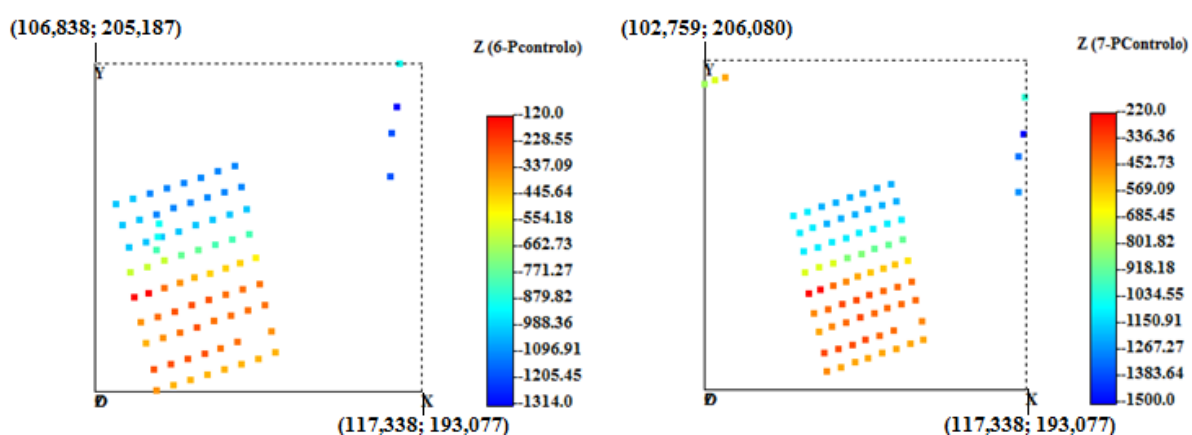


Figura 3.7 - Distribuição espacial dos *Pontos de Controlo* nas unidades 6 (esquerda) e 7 (direita).

Apresenta-se, de seguida, uma análise univariada preliminar destes dados. Constatou-se que, nos *Pontos de Controlo*, os valores da unidade 6 apresentam uma média de -643 m e variância de 121 760 m², enquanto na unidade 7 a média é -733.1 m e a variância 122 044 m².

Tabela 3.6 - Análise univariada preliminar dos *Pontos de Controlo* na unidade **6**.

Unidade 6 - Almargem						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Pontos de controlo</i>	80	-1314.0	-120.0	-643.2	121 760.4	348.9

Tabela 3.7 - Análise univariada preliminar dos *Pontos de Controlo* na unidade **7**.

Unidade 7 - Barremiano-Berriasiano						
Fonte	Total de pontos	Mínimo (m a.n.m.)	Máximo (m a.n.m.)	Média (m a.n.m.)	Variância (m a.n.m.) ²	Desvio padrão (m a.n.m.)
<i>Pontos de controlo</i>	80	-1500.0	-220.0	-733.1	122 044.0	349.4

3.3. Síntese do processamento da base de dados

Em suma, a base de dados obtida no final desta fase contém os topos das unidades litostratigráficas **6** e **7**, com a informação das cotas que consta nos ficheiros preparados com base em dados originais (*Cartografia detalhada*, *Furos* e *Sísmica*) e em dados processados (*Cartografia simplificada* e *Pontos de Controlo*).

Esta base de dados simplificada e retificada é um *input* para a modelação geoestatística. No entanto, o *input* não é de todo estático, devendo antes ser alvo de constante atualização e confrontação com a realidade conhecida, o que é possível conjugando o conhecimento pericial e empírico da situação com os resultados de modelação que vão sendo obtidos. Esta abordagem permite assegurar a maior proximidade possível do modelo à realidade, tal como é.

Este *input* totaliza 6356 pontos, dos quais 2785 são do topo da unidade **6** e 3571 pertencem ao topo da unidade **7**. Na Tabela 3.8 apresenta-se a discriminação do total de pontos em função da fonte, para cada unidade e na Figura 3.8 mostra-se a sua localização.

Tabela 3.8 - Total de pontos, em função da fonte, para as unidades **6** e **7**.

Total de pontos (densidade)			
Fonte		Unidade 6	Unidade 7
Dados originais	<i>Cartografia detalhada</i>	2534	3363
	<i>Furos</i>	83	58
	<i>Sísmica</i>	32	17
Dados processados	<i>Cartografia simplificada</i>	56	53
	<i>Pontos de Controlo</i>	80	80
		$\Sigma = 2785$	$\Sigma = 3571$
		Σ (unidades 6 e 7) = 6356	

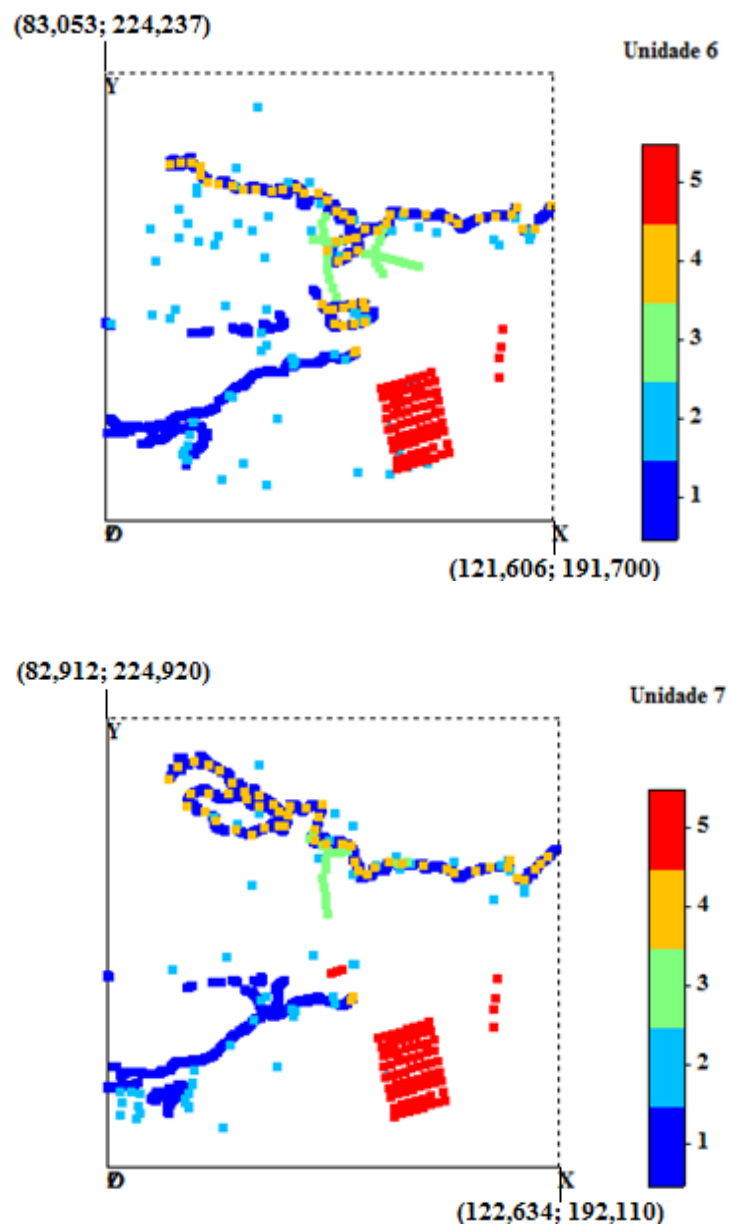


Figura 3.8 - Localização dos dados da unidade 6 (acima) e unidade 7 (abaixo), por fonte: 1-*Cartografia detalhada*, 2-*Furos*, 3-*Sísmica*, 4-*Cartografia simplificada*, 5-*Pontos de Controlo*.

4. MODELAÇÃO GEOESTATÍSTICA

4.1. Apresentação da metodologia

Os métodos geoestatísticos são utilizados para a modelização de fenómenos espaciais naturais e estruturados, associando a componente naturalista aos fundamentos teóricos das funções aleatórias (Soares, 2006). Estes fenómenos são expressos por variáveis aleatórias.

Genericamente, qualquer metodologia geoestatística envolve 3 etapas:

- Variografia, de modo a quantificar a continuidade espacial da variável em estudo;
- Estimação ou simulação da variável, para gerar modelos;
- Validação dos modelos, através da proximidade dos resultados à realidade e aos objetivos do trabalho.

A variografia é essencial enquanto suporte da modelação que descreve a continuidade e homogeneidade estrutural do fenómeno ou variável em estudo, do qual só é conhecido um conjunto limitado de amostras.

A estimação consiste na interpolação espacial baseada no formalismo da *krigagem* e resulta numa imagem média e contínua, enquanto a simulação produz um conjunto de imagens equiprováveis. A *krigagem* é a denominação para estimador linear geoestatístico, que consiste num conjunto de processos que permitem inferir espacialmente os valores de uma variável em localizações não amostradas, com base numa combinação linear de observações pontuais. Barbosa (2002) refere que a principal limitação deste método é o facto de este atenuar os valores em torno da média, o que conduz a enviesamentos na estimação de valores extremos.

Recordando o objetivo fundamental deste trabalho de obter uma representação subsuperficial da geometria de duas unidades litostratigráficas do Cretácico Inferior na região de Lisboa, optou-se por recorrer a ferramentas de estimação por *krigagem* para produzir superfícies contínuas e representativas dos topos destas.

A metodologia adotada nesta fase teve como base o encadeamento genérico acima exposto (variografia, estimação e validação). Contudo, a etapa de estimação foi adaptada às unidades litostratigráficas em estudo e aos resultados que foram surgindo, como se explica de seguida e se esquematiza nos fluxogramas das Figuras 4.1 e 4.2.

Concretamente, o topo da unidade **6-Almargem** foi estimado de modo independente, enquanto o topo da unidade **7-Barremiano-Berriasiano** foi estimado de modo dependente em relação à unidade anterior devido à forte correlação que existe entre ambos, como será descrito adiante no presente capítulo.

Para o topo da unidade **6**, a abordagem que se estabeleceu para produzir os melhores resultados foi considerar, para a estimação, as cotas que provêm de dados originais (*Furos* e *Sísmica*) e dados processados (*Cartografia simplificada* e *Pontos de Controlo*), através de *krigagem* ordinária.

Numa fase posterior do processo de modelação, com o intuito de afinar o modelo geoestatístico com informação de pormenor da cartografia geológica, recorreu-se à *krigagem* simples com médias locais considerando como "*hard data*" a *Cartografia detalhada* e como "*soft data*" a superfície

anteriormente gerada por *krigagem* ordinária. Verificou-se, contudo, que a opção por introduzir apenas a *Cartografia detalhada* provocava o desvanecimento de informação anteriormente introduzida, nomeadamente dos dados sísmicos, o que é devido à elevada desproporção na densidade de amostragem destes dados, em comparação com as outras fontes, e consequentes diferenças nas respetivas malhas de amostragem. É de salientar que estes se revestem de elevada importância para o presente estudo, devido às profundidades que alcançam. Para contornar este obstáculo, foi reintroduzida a informação da variável a modelar respeitante aos pontos da *Sísmica*, passando a "*hard data*" a ser constituída pela *Cartografia detalhada* e *Sísmica*.

Em relação ao topo da unidade **7** pretendia-se que fossem respeitados os resultados da estimação da unidade **6**, que lhe é estratigraficamente e imediatamente sobrejacente. Assim, e atendendo-se à alta correlação entre estas duas unidades, optou-se por recorrer à *co-krigagem* co-localizada. Os melhores resultados foram obtidos considerando a estimação da variável primária, unidade **7**, para locais em que coexistem simultaneamente dados de ambas as unidades, neste caso concreto em pontos obtidos a partir de *Furos* e *Sísmica*. Devido à maior escassez de dados particularmente em certos locais pretendidos modelar, optou-se igualmente por considerar uma parte suficientemente representativa dos *Pontos de Controlo*.

Posteriormente, para acrescentar informação respeitante aos pontos da cartografia geológica, recorreu-se à *krigagem* simples com médias locais considerando como "*hard data*" a *Cartografia simplificada* e como "*soft data*" a superfície anteriormente estimada por *co-krigagem* co-localizada. De modo a respeitar todos os dados amostrais e devido à imposição de base que este método introduz, em que são consideradas as médias locais do conjunto de dados das matrizes "*soft*" foi igualmente necessário nesta fase, considerar a reintrodução da informação da variável a modelar respeitante aos pontos de *Furos*, da *Sísmica* e a totalidade dos *Pontos de Controlo*.

Uma vez geradas duas superfícies consideradas adequadas e resultantes da estimação primária e secundária para cada unidade, foi elaborado um teste de validação cruzada ou ponto fictício, com o intuito de avaliar a representatividade dos modelos selecionados. A técnica de validação cruzada consiste em estimar valores em locais com pontos amostrados, suprimindo em cada iteração uma amostra do conjunto e utilizando as restantes amostras para a estimação (Monego *et al.*, 2007). Deste modo, foi possível comparar os valores observados (ou amostrados) com os valores estimados nos locais correspondentes e avaliar os erros, i.e. as diferenças entre os valores observados e estimados.

Quando a estimação por *krigagem* produziu resultados com enviesamentos significativos dos valores extremos, procedeu-se a uma retificação final simples, em que se eliminaram os valores estimados acima dos máximos e abaixo dos mínimos da variável em estudo, de modo a respeitar os intervalos dos valores conhecidos.

A metodologia de modelação geoestatística apresentada foi estabelecida de modo a produzir os melhores resultados possíveis, considerando-se os métodos de estimação mais prementes e disponíveis, bem como as suas limitações e sob o objetivo de, num modo sequencial, ser possível integrar nos modelos tridimensionais (3D) informação de natureza distinta e obtida segundo detalhes

igualmente distintos. É de referir que foram exploradas outras possíveis alternativas, tendo-se verificado, na fase experimental, em que se testaram distintas possibilidades de modelação, que o método sequencial apresentado e bom sucesso da sua adoção depende da natureza intrínseca do conjunto de dados de partida a utilizar devendo ser sempre ponderado “caso a caso”. Concretamente, nos casos de utilização do método de *krigagem* simples com médias locais, em que se pretende afinar os modelos gerados introduzindo informação de maior pormenor para contornar as limitações associadas à *krigagem*, há que adotar uma perspetiva crítica dos resultados, devendo estes ser cuidadosamente verificados nos locais onde há menor densidade de amostragem, uma vez que são mais suscetíveis de perder relevância, introduzindo erros consideráveis e afastando-se da realidade.

A última etapa consistiu na validação, através da visualização 3D das superfícies geradas e a utilizar futuramente, em que se confrontaram os resultados obtidos com a informação de partida e com outras informações que, em conjunto, constituem o conhecimento da situação em estudo.

No presente trabalho, toda a componente de modelação geoestatística foi realizada com o *Geostatistical Modelling Software* (geoMS).

No Anexo 4 apresentam-se os fundamentos teóricos geoestatísticos em que se baseou este trabalho, bem como as razões para a escolha dos métodos utilizados.

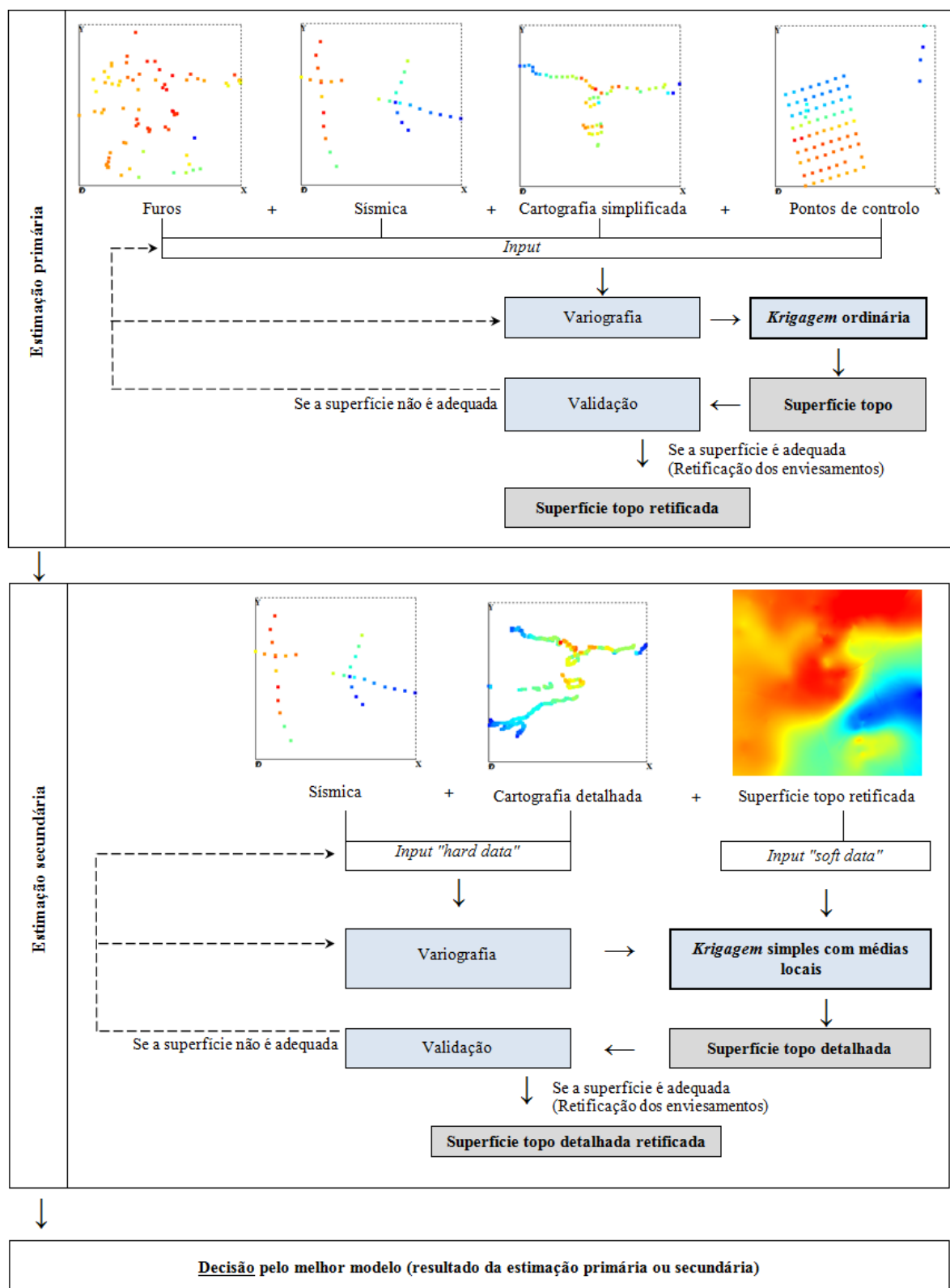


Figura 4.1 - Fluxograma de metodologia para a estimação do topo da unidade 6.

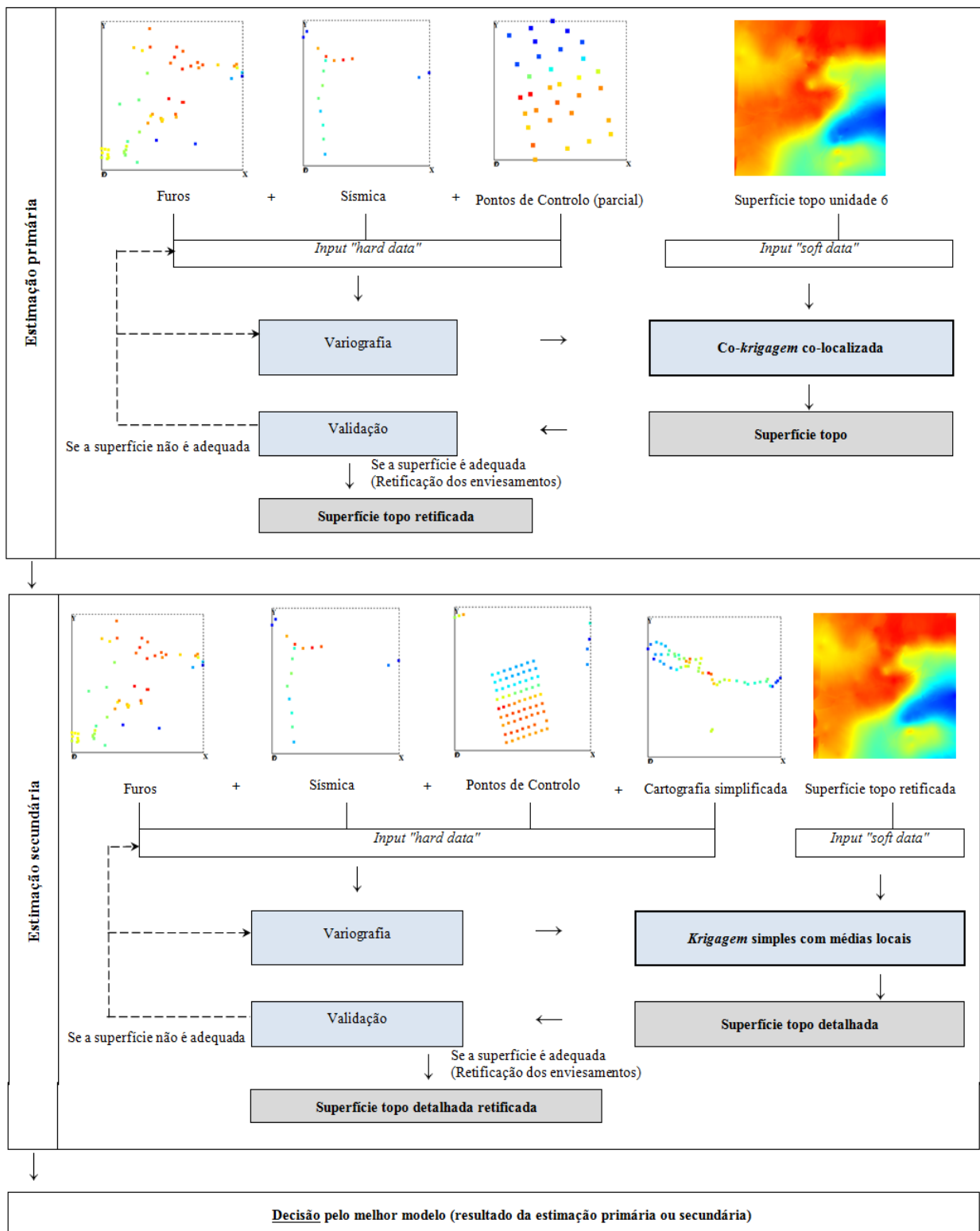


Figura 4.2 - Fluxograma de metodologia para a estimação do topo da unidade 7.

4.2. Aplicação ao caso de estudo

4.2.1. Unidade litostratigráfica 6-Almargem

4.2.1.1. Estimação primária

4.2.1.1.1. Dados de partida

O conjunto de dados considerado para a estimação primária do topo da unidade 6 foi:

- *Cartografia simplificada*,
- *Furos*,
- *Sísmica*,
- *Pontos de Controlo*.

Na Figura 4.3 apresenta-se a distribuição espacial destes pontos, que novamente mostra disparidades consideráveis na sua densidade. Além disso, é importante destacar o significativo contraste entre as malhas de amostragem, que é especialmente notório entre a malha regular dos *Pontos de Controlo* que foram introduzidos com base no furo AC1-BALUM e nos cortes geológicos (ver sub-capítulo 3.2.2.) e as malhas irregulares das restantes fontes.

Acresce ainda que, por um lado, existe uma zona em que a informação proveniente da *Sísmica*, com dados em profundidades consideráveis, está muito próxima da fonte *Cartografia simplificada*, com dados superficiais. Por outro lado, há locais em que não existe qualquer informação, nomeadamente na envolvente aos *Pontos de Controlo*. Esta conjuntura reflete-se, necessariamente, em dificuldades na modelação geoestatística. Na Figura 4.3 destaca-se também a localização das linhas sísmicas e da malha regular dos *Pontos de Controlo* na área de amostragem.

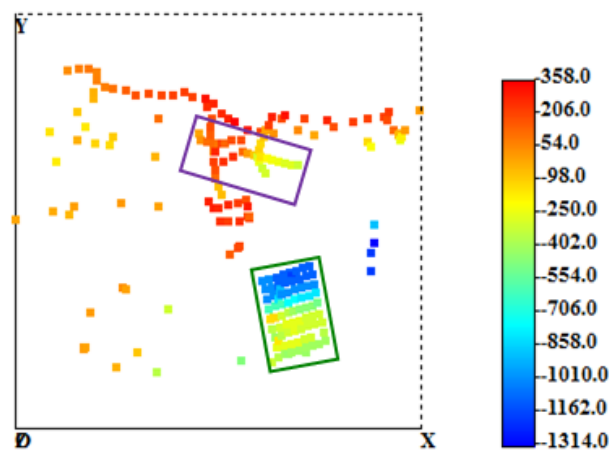


Figura 4.3 - Distribuição espacial dos dados de partida, considerados para a estimação primária da unidade 6. Destaque para a localização das linhas sísmicas, a Norte (retângulo roxo), e da malha regular dos *Pontos de Controlo*, a Sudeste (retângulo verde) da área de amostragem.

Do ponto de vista estatístico (Figura 4.4) observa-se nesta unidade assimetria negativa dos dados de partida. As cotas variam de -1314 a 358 m, sendo a média -147 m. A variância é de 176 016 m², correspondendo aos ~420 m de desvio padrão, indicativos do afastamento dos valores em relação à média.

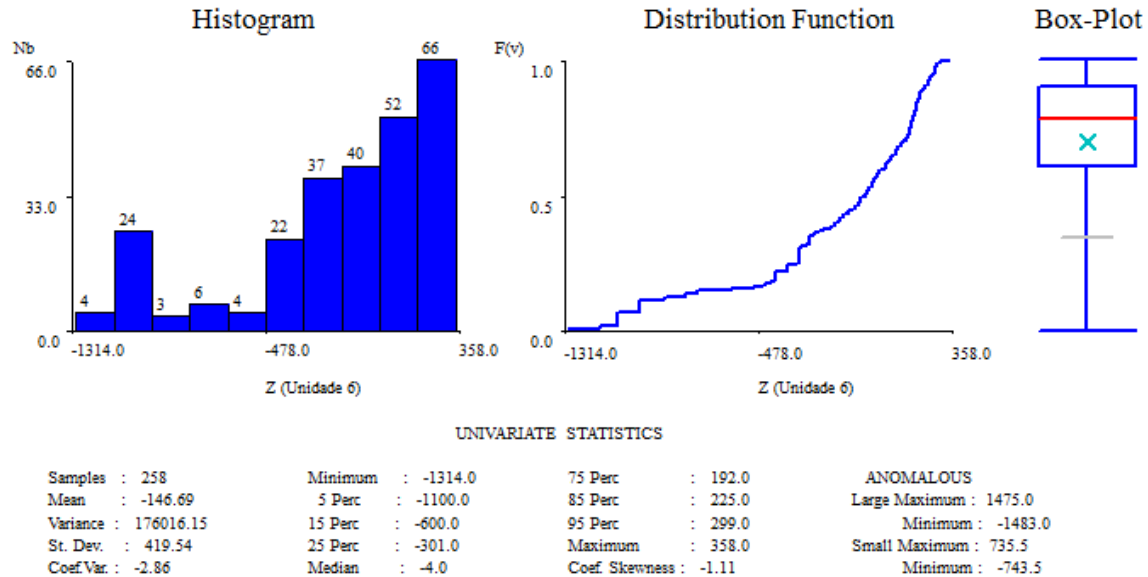


Figura 4.4 - Estatísticos simples dos dados de partida, considerados para a estimação primária da unidade 6.

4.2.1.1.2. Análise da continuidade espacial

A primeira fase consistiu na análise espacial com recurso à variografia para a unidade 6, em que preliminarmente foi elaborado o variograma omnidirecional, por forma a combinar todas as possíveis direções num único variograma.

A escolha dos parâmetros foi realizada de modo iterativo, em que foram feitos diversos ensaios até se terem atingido resultados aceitáveis. Concretamente consideraram-se 14 passos, uma tolerância de 180°, uma distância entre passos de 2000 m e uma distância de corte de 40 000 m.

O ajuste do variograma omnidirecional foi realizado com uma combinação linear de duas estruturas, definidas por efeito de pepita e modelo gaussiano.

O efeito de pepita (C_0) quantifica a variabilidade a uma escala inferior à malha de amostragem e à escala da amostra, estando relacionado com a elevada proximidade entre amostras, sobretudo no caso dos dados da cartografia, que pode induzir a "erros" de amostragem, tendo-se considerado para C_0 o valor de 100 m porque se verificou que existem amostras distanciadas a valores inferiores.

Tendo em conta que a variável em estudo, cota, define superfícies contínuas, considerou-se o modelo gaussiano como o mais apropriado para o ajuste, uma vez que este se caracteriza por um crescimento lento junto da origem, que o torna adequado a fenómenos relativamente regulares.

Posteriormente foi explorada a possibilidade de existência de anisotropia, tendo para tal sido feita uma pesquisa por direções; esta etapa condicionará os resultados da estimação, pelo que se reveste

Capítulo 4

de elevada importância. Assim, definiram-se 9 direções e respectivas perpendiculares para analisar o comportamento da variável em estudo, $Z(x)$, o que resultou em 18 variogramas experimentais para o topo da referida unidade; estes foram posteriormente ajustados por modelos teóricos de funções. Os parâmetros considerados foram os acima descritos, com a única diferença na tolerância (25°).

Constatou-se que os variogramas direcionais apresentavam diferentes amplitudes, o que está relacionado com a coexistência de estruturas a diferentes escalas de variabilidade nos dados. As direções pertencentes ao subquadrante N-NW foram as que mostraram os melhores modelos de variograma.

O ajuste dos variogramas direcionais foi testado em duas hipóteses:

- Combinação linear de duas estruturas - efeito de pepita e modelo gaussiano;
- Combinação linear de três estruturas - efeito de pepita, modelo esférico e modelo gaussiano.

Em todos os casos experimentados assumiu-se a existência de efeito de pepita e de uma estrutura de elevada continuidade, expressa pelo modelo gaussiano, pelas razões anteriormente descritas.

No caso do ajuste dos variogramas com duas estruturas, observou-se a existência de anisotropia geométrica, em que o patamar é constante, mas as amplitudes diferem com a direção.

No ajuste com três estruturas considerou-se, além do efeito de pepita e modelo gaussiano, o modelo esférico. Este último permite avaliar as variabilidades a uma escala local, inferior à estrutura de maior continuidade, sendo indicado para fenómenos aproximadamente irregulares, uma vez que se caracteriza por um crescimento rápido junto da origem. Detetou-se, assim, a coexistência simultânea de várias estruturas (Barbosa, 2002).

Apresentam-se de seguida os parâmetros de modelização variográfica (Tabelas 4.1 a 4.3) que permitiram obter os modelos variográficos (Figuras 4.5 a 4.7) e que foram utilizados nas estimações subsequentes.

Tabela 4.1 - Parâmetros de modelização variográfica omnidirecional com duas estruturas.

Omnidirecional		
Estrutura	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)
Modelo		Gaussiano
Patamar (C)	100 m	176 000 m
Amplitude (a)		7500 m

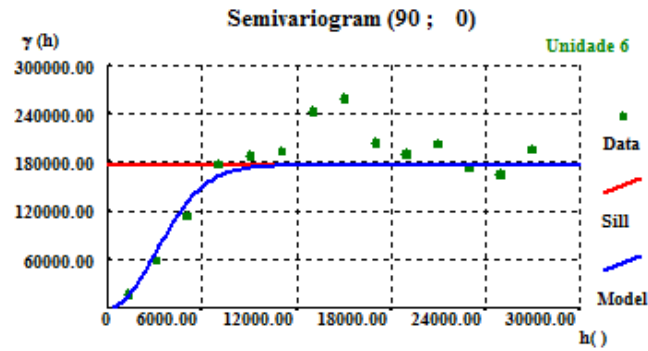


Figura 4.5 - Modelo variográfico omnidirecional ajustado com duas estruturas.

No caso do ajuste com duas estruturas, a direção $(-80,0)$ e respetiva perpendicular $(10,0)$ foi a que mostrou os melhores modelos de variograma, em que é evidente a tendência dos pontos para o patamar. Note-se que a amplitude é superior na $(-80,0)$, tendo esta sido tomada como a direção principal e a $(10,0)$ como secundária, na estimação. A razão de anisotropia era de 1.6, mas foi diminuída para 1.2 na estimação para diminuir a ocorrência de artefactos.

Tabela 4.2 - Parâmetros de modelização variográfica direcional com duas estruturas.

Estrutura	Direção principal $(-80, 0)$		Direção secundária $(10, 0)$	
	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)
Modelo		Gaussiano		Gaussiano
Patamar (C)	100 m	176 000 m	100 m	176 000 m
Amplitude (a)		12 000 m		7500 m
Razão de anisotropia	$R_1=1.6$			

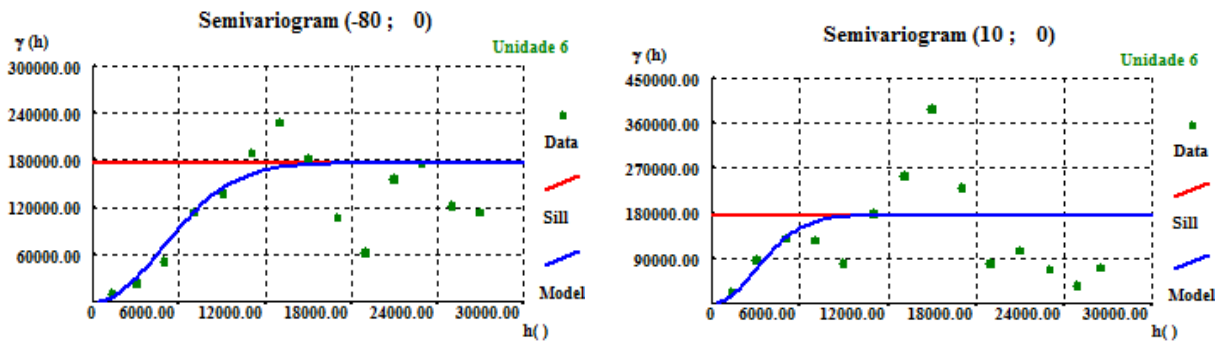
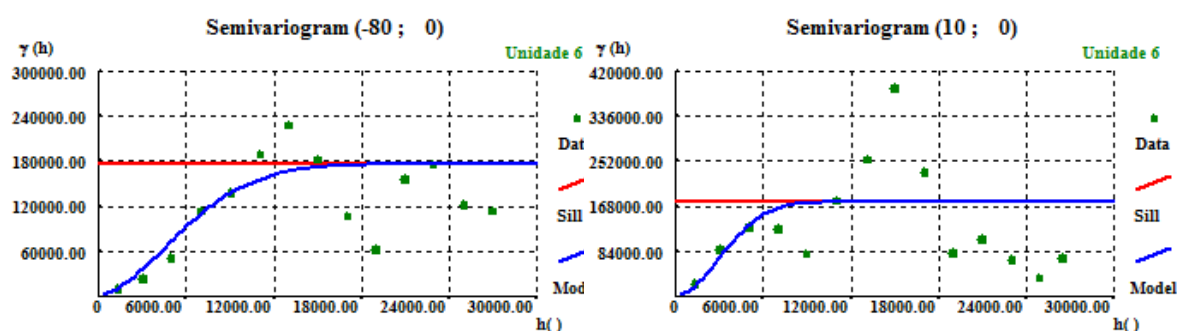


Figura 4.6 - Modelo variográfico ajustado com duas estruturas na direção $(-80, 0)$ (esquerda) e $(10, 0)$ (direita).

No ajuste com três estruturas, consideraram-se as mesmas direções para a estimação, ou seja, $(-80,0)$ e $(10,0)$.

Tabela 4.3 - Parâmetros de modelização variográfica direcional com três estruturas.

Estrutura	Direção principal (-80, 0)			Direção secundária (10, 0)		
	Efeito de pepita (C ₀)	Estrutura 1 (C ₁)	Estrutura 2 (C ₂)	Efeito de pepita (C ₀)	Estrutura 1 (C ₁)	Estrutura 2 (C ₂)
Modelo		Esférico	Gaussiano		Esférico	Gaussiano
Patamar (C)	100 m	31 000 m	145 000 m	100 m	31 000 m	145 000 m
Amplitude (a)		8000 m	13 500 m		8000 m	13 500 m
Razão de anisotropia	R ₁ =1			R ₂ =1		

**Figura 4.7** - Modelo variográfico ajustado com três estruturas na direção (-80, 0) (esquerda) e (10, 0) (direita).

4.2.1.1.3. Estimação por *krigagem* ordinária

Numa primeira fase, o estimador *krigagem* ordinária foi utilizado para gerar o topo da unidade 6, tendo-se considerado o critério de busca geral, com 1 amostra no mínimo e 64 amostras no máximo. Na Tabela 4.4 apresentam-se outros parâmetros considerados na estimação, para a geração da *grid*.

Tabela 4.4 - Parâmetros considerados na estimação, para a geração da *grid*.

Eixo	Coordenada mínima (m)	Coordenada máxima (m)	Número de células	Espaçamento (m)
X	88 000	117 500	591	50
Y	191 000	220 000	581	50

O campo de amostragem da modelação é de 858.4 km² (29 550 x 29 050 m), sendo inferior à área inicial em estudo (960 km²). Neste novo campo foram gerados 343 371 células.

Apresentam-se, de seguida, os resultados da estimação com base nos modelos variográficos omnidirecional e direcional com existência de duas e três estruturas, sob a forma de mapa dos valores estimados e variância associada, confrontando com os dados de partida (Figuras 4.8 a 4.10).

Quando estes resultados se mostraram adequados do ponto de vista geoestatístico e coerentes com o conhecimento que se tem da situação em estudo, foi também realizada uma retificação simples dos enviesamentos.

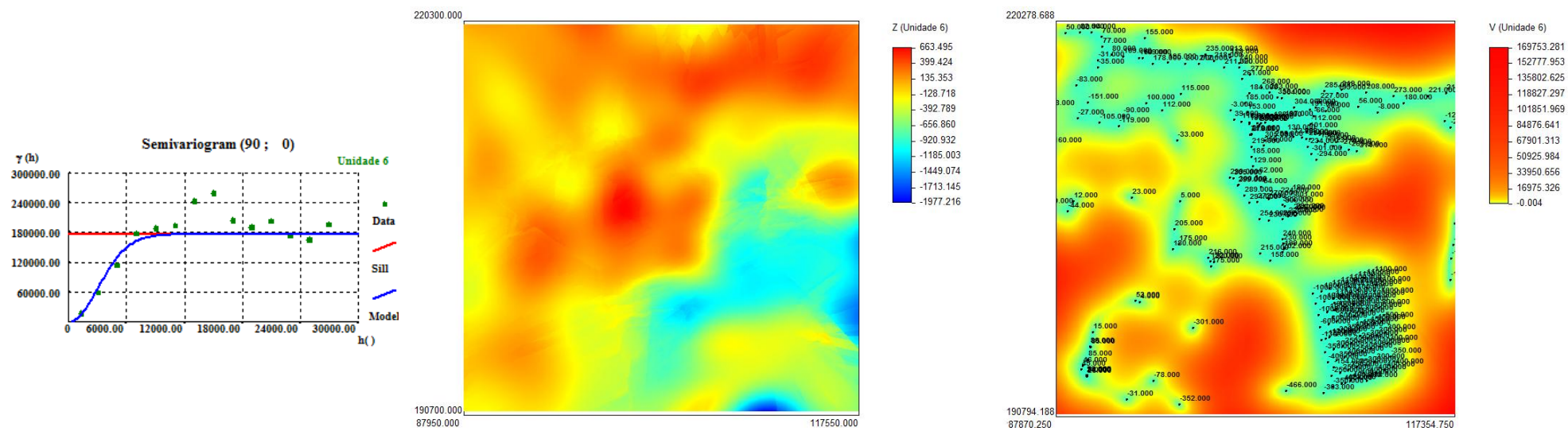


Figura 4.8 - Modelo variográfico omnidirecional com duas estruturas (**esquerda**), superfície topo (**centro**) e respetiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida (**direita**).

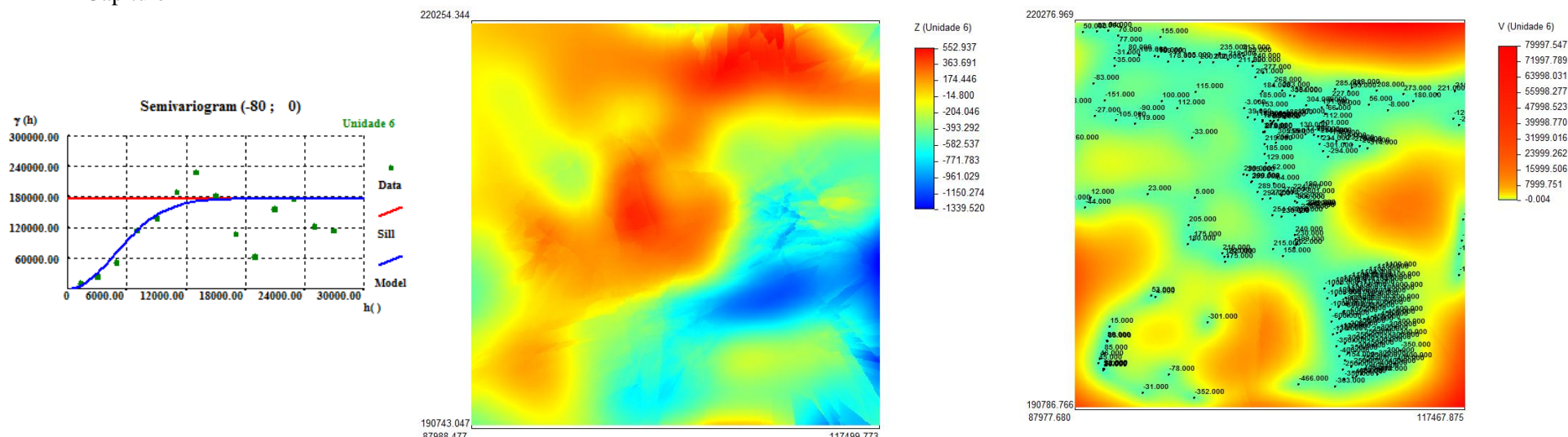


Figura 4.9 - Modelo variográfico com duas estruturas na direção principal (**esquerda**), superfície topo (**centro**) e respectiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida (**direita**).

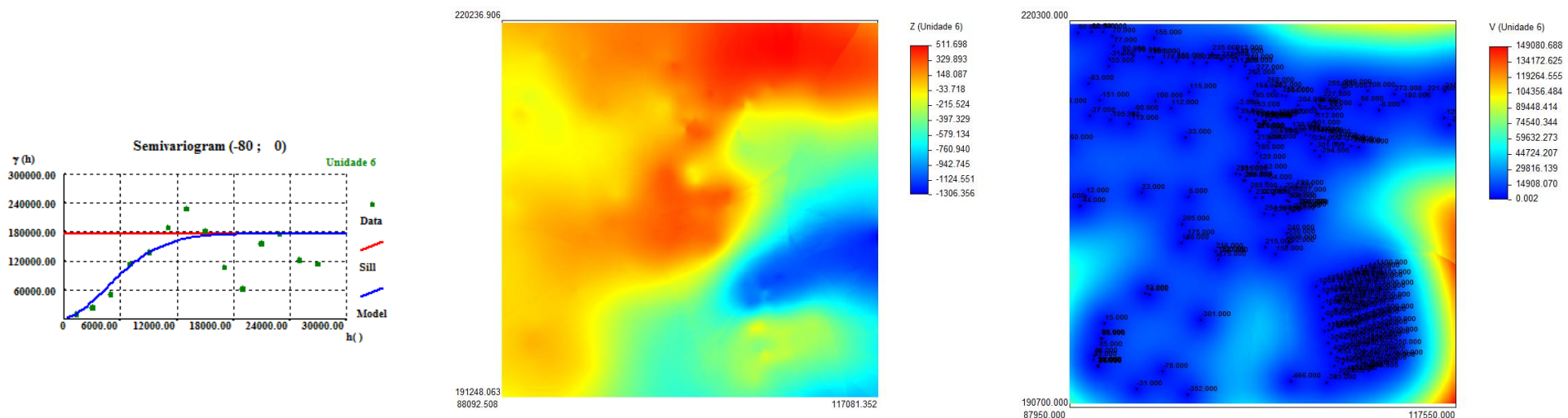


Figura 4.10 - Modelo variográfico direcional com três estruturas na direção principal (-80,0) (**esquerda**), superfície topo (**centro**) e respectiva variância de estimação com confrontação dos dados de partida (**direita**).

Analisando os resultados obtidos constataram-se os seguintes factos:

(1) No modelo gerado com base no variograma omnidirecional (Figura 4.8), em que se assumiu a existência de duas estruturas, o mapa da estimação apresenta artefactos e pouca continuidade nos valores, não refletindo o comportamento homogéneo que se espera da variável em estudo. Por outro lado, os resultados são bastante enviesados. Concretamente, destaca-se que foram estimados valores de máximo e mínimo na ordem dos 660 m e -1977 m, respetivamente, que ultrapassam muito os valores correspondentes que se conhecem dos dados de partida (358 m e -1314 m). Em relação à variância, esta é próxima do patamar (cerca de 170 000 m² e 176 000 m², respetivamente), o que poderia levar a pensar que se trata de uma boa estimação. Contudo, na envolvente dos dados de partida ocorrem mudanças significativas, observando-se em certos locais, muito próximos dos pontos amostrados, variância mínima e noutros variância máxima. Assim, esta estimação tem associada alguma incerteza.

(2) Relativamente à superfície gerada com base no variograma direcional, ajustado com duas estruturas (Figura 4.9), observam-se artefactos mais acentuados que no caso anterior e, novamente, pouca continuidade nos valores estimados. Os resultados não são muito enviesados, observando-se apenas enviesamento do valor máximo estimado (aproximadamente 550 m). A variância (80 000 m²) é muito inferior ao patamar, indicando que esta estimação tem elevada incerteza.

(3) No modelo gerado com base no variograma direcional, em que se assumiu a existência de três estruturas (Figura 4.10), o mapa da estimação reflete o comportamento homogéneo da variável em estudo. Observa-se uma maior continuidade nos valores de cota a Norte, que são positivos, o que é explicado pelo facto de existir aí elevada densidade de pontos que foram obtidos a partir da cartografia geológica na escala 1: 50 000. A transição dos valores mais elevados (em tons avermelhados) para os valores mais baixos (tons azulados) ocorre de forma brusca quando existem dados que forcem a estimação noutro sentido, como se verifica por exemplo na zona representada a azul, que é claramente o resultado dos *Pontos de Controlo*. Em relação à variância, esta é próxima do patamar (cerca de 149 000 m² e 176 000 m², respetivamente). Além disso, nos locais que têm pontos amostrados a variância é praticamente nula; na sua envolvente, esta varia de modo gradual, aumentando com o incremento da distância aos referidos pontos. Os locais que têm variâncias elevadas (tons avermelhados) correspondem, como é natural, a zonas em que há carência de dados. Uma possível solução para se diminuir a variância de estimação é, no futuro, a de se introduzir mais *Pontos de Controlo* que respeitem a informação que se conhece. Deste modo, esta última é uma estimação que tem incerteza reduzida e é coerente com a situação em estudo, tendo sido considerada uma superfície adequada, a utilizar nas etapas subsequentes.

4.2.1.1.4. Validação cruzada

Nesta etapa foi elaborado um teste validação cruzada à superfície selecionada, apresentando-se a comparação entre os valores de cotas observados e estimados, assim como os erros das estimações e valores observados correspondentes nas Figuras 4.11 e 4.12, respetivamente, sob a forma de diagramas de dispersão.

A comparação entre os valores observados e estimados apresenta uma nuvem de pontos pouco dispersa em torno da bisetriz, o que indica que estes valores são semelhantes entre si.

No caso dos erros das estimações é possível verificar que a nuvem de pontos tende para zero, constatando-se, no entanto, que os erros tendem a aumentar para valores de cota negativos, o que se deve ao facto de serem diminutas, em termos de densidade (Ver subcapítulo 3.1.2), as amostras em que se registam estes valores (provêm essencialmente dos *Furos*, *Sísmica* e *Pontos de Controlo*), em comparação com as amostras que registam valores de cota positivos (provenientes sobretudo da *Cartografia*).

Salienta-se que apenas um ponto mostrou um erro na ordem dos 350 m, correspondente a uma amostra dos *Pontos de Controlo* que não tem outras amostras na sua envolvente.

Do ponto de vista estatístico (Tabela 4.5), estes erros variam entre 0 e 354 m, sendo a média 41 m e o erro quadrático médio 440 784 m².

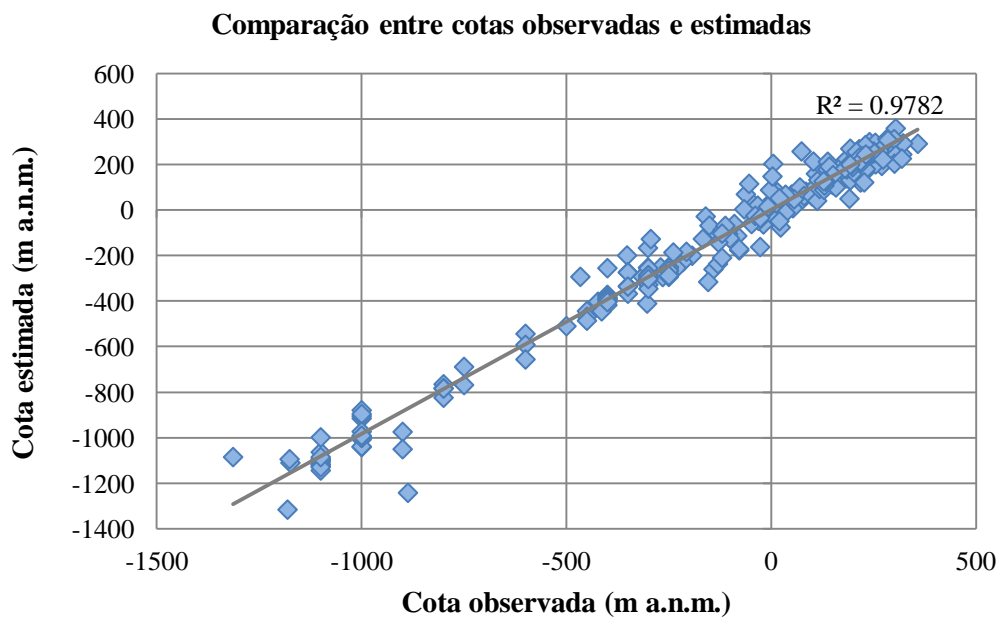


Figura 4.11 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação primária da unidade 6.

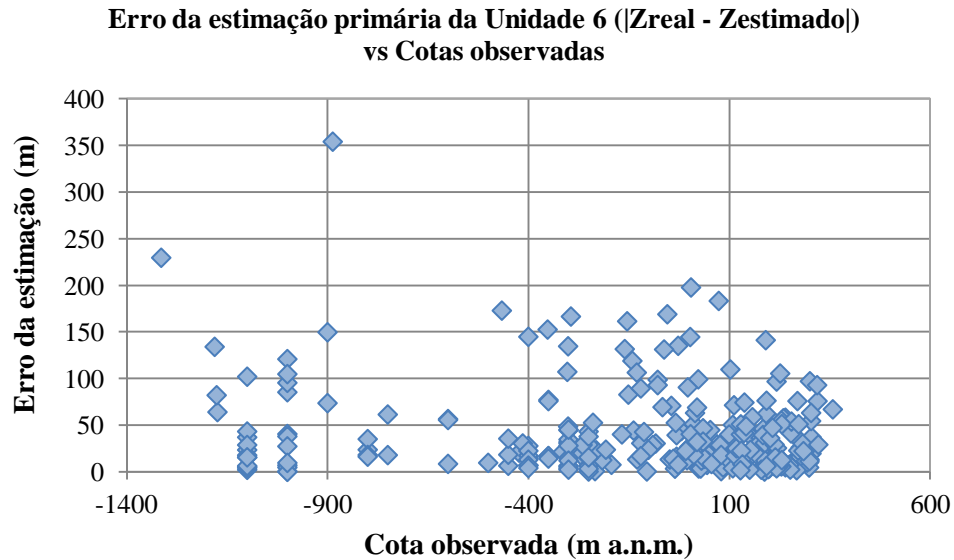


Figura 4.12 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação primária da unidade 6.

Tabela 4.5 - Estatísticos simples dos erros de estimação primária da unidade 6.

Erro da estimação primária (Unidade 6)				
Total de pontos	Mínimo (m)	Máximo (m)	Erro médio (m)	Erro quadrático médio (m ²)
258	0.0	354.2	41.3	440 783.9

4.2.1.1.5. Análise univariada e retificação da estimação

Nesta fase foi elaborada uma análise univariada preliminar dos valores estimados (Figura 4.13) com o intuito de conhecer o seu comportamento estatístico e comparar com os dados de partida, tendo-se considerado a média, o mínimo e o máximo.

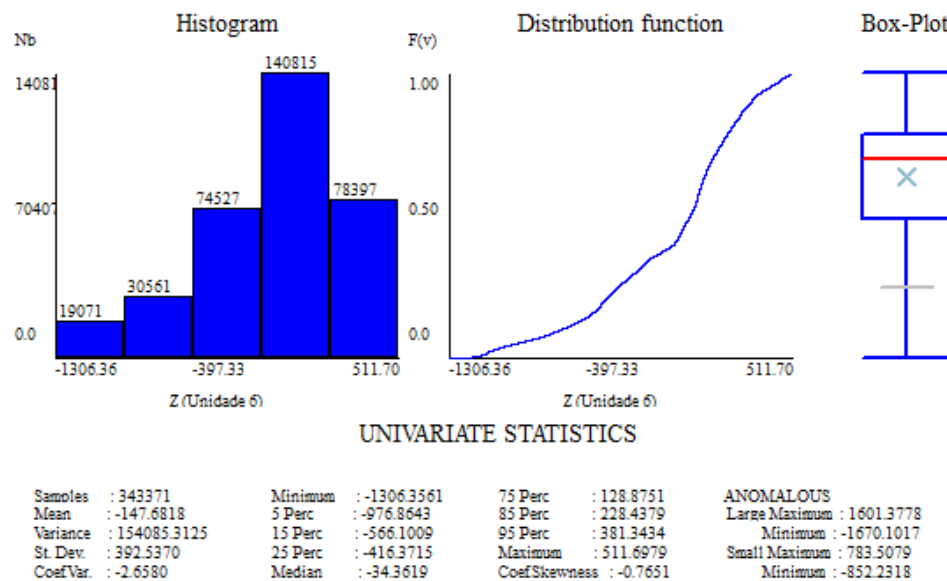


Figura 4.13 - Estatísticos simples da superfície seleccionada da unidade 6, estimada por *krigagem* ordinária.

Os estatísticos básicos da estimação permitiram constatar que, em relação à média, os valores de partida e estimados estão na mesma ordem de grandeza, sendo -147 e -148 m, respectivamente. Além disso, observando o histograma absoluto, confirmou-se que a maior parte dos pontos estimados apresenta valores positivos.

No modelo geoestatístico selecionado, as cotas foram estimadas entre -1306 e 512 m; o mínimo respeita o correspondente valor de partida (-1314 m), no entanto o máximo ultrapassa o valor que se conhece dos dados de partida (358 m), tendo-se optado por retificar a *grid* de modelação.

Verificou-se que apenas 5.9 % dos pontos careciam de retificação, em que se substituíram os valores superiores a 358 m por este mesmo valor. Na Figura 4.14 apresenta-se a superfície estimada retificada.

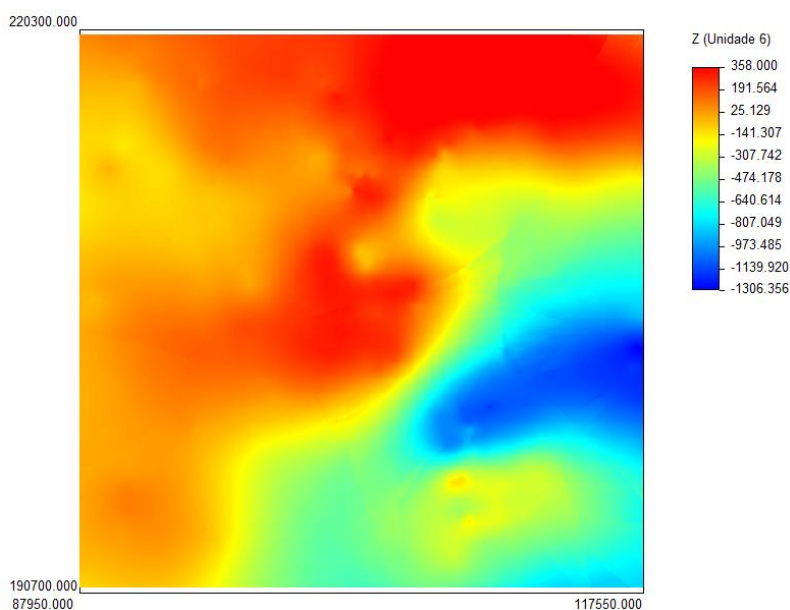


Figura 4.14 - Superfície topo estimada por *krigagem* ordinária e retificada da unidade 6.

4.2.1.2. Estimação secundária

4.2.1.2.1. Dados de partida

A variável secundária ou "*soft data*" considerada corresponde com a superfície anteriormente estimada por *krigagem* ordinária, que tem como base o modelo variográfico ajustado com três estruturas, e que foi posteriormente retificada.

A variável primária ou "*hard data*" foi o conjunto de dados que produziu o melhor resultado, ou seja, o que mais se aproxima da realidade. Neste caso introduziu-se informação de:

- *Cartografia detalhada,*
- *Sísmica.*

Na Figura 4.15 apresenta-se a distribuição espacial dos referidos pontos.

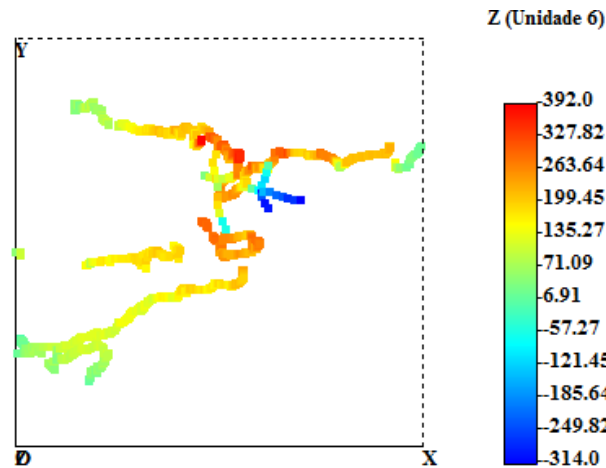


Figura 4.15 - Distribuição espacial dos dados de partida "hard data", considerados para a estimação secundária da unidade 6.

Em termos estatísticos (Figura 4.16), as cotas estão compreendidas entre -314 e 392 m, sendo a média 172 m. A variância é de 7643 m², correspondendo aos ~87 m de desvio padrão, sendo a dispersão claramente inferior à que se tinha na situação de partida inicial.

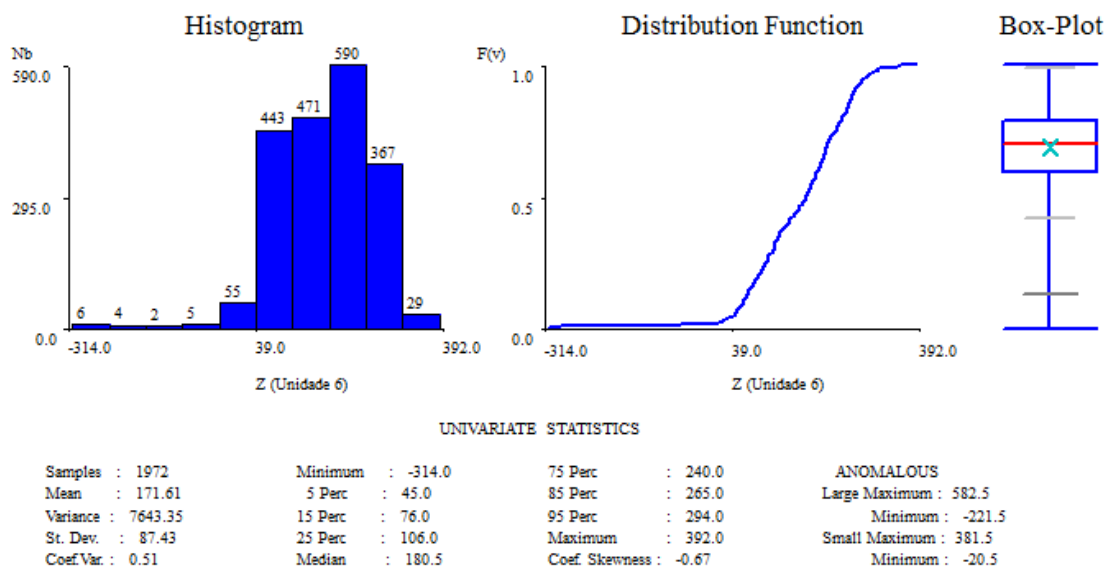


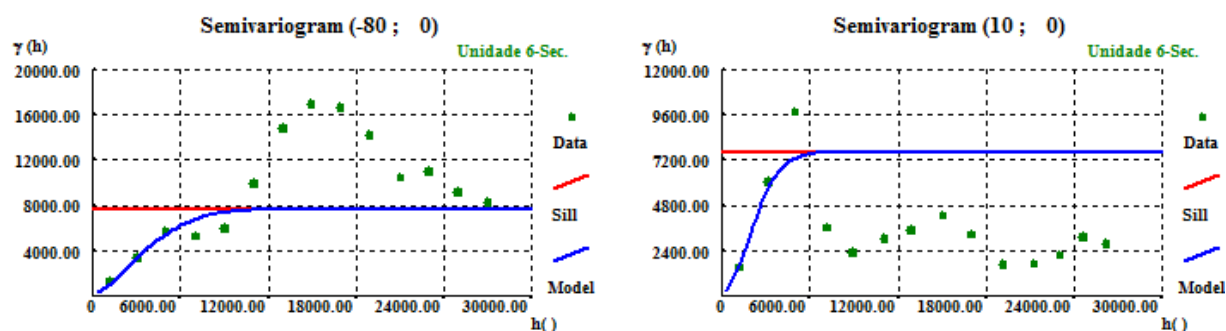
Figura 4.16 - Estatísticos simples dos dados de partida "hard data", considerados para a estimação secundária da unidade 6.

4.2.1.2.2. Análise da continuidade espacial da variável primária "hard data"

Os parâmetros utilizados foram os que tinham sido considerados nos casos anteriores, ou seja, 14 passos, uma tolerância de 25°, uma distância entre passos de 2000 m e uma distância de corte de 40 000 m. Optou-se novamente pelo variograma nas direções (-80,0) e (10,0), que foi ajustado segundo os parâmetros indicados na Tabela 4.6. Na Figura 4.17 apresentam-se os variogramas nas referidas direções. De referir que, na Estrutura 2, a razão de anisotropia era de 1.7 mas foi diminuída para 1.2 na estimação.

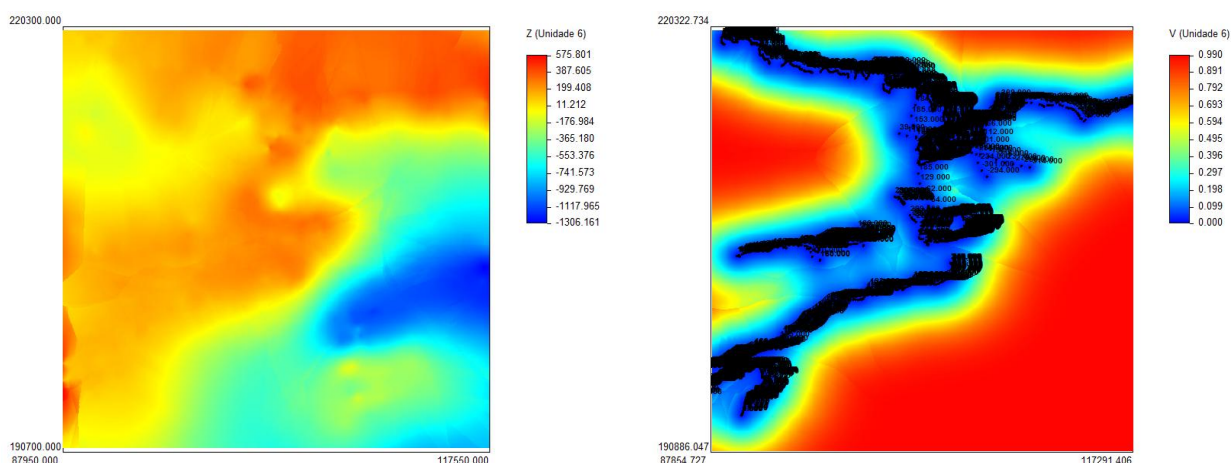
Tabela 4.6 - Parâmetros de modelização variográfica da variável primária.

Estrutura	Direção principal (-80, 0)			Direção secundária (10, 0)		
	Efeito de pepita (C ₀)	Estrutura 1 (C ₁)	Estrutura 2 (C ₂)	Efeito de pepita (C ₀)	Estrutura 1 (C ₁)	Estrutura 2 (C ₂)
Modelo		Esférico	Gaussiano		Esférico	Gaussiano
Patamar (C)	100 m	1500 m	6000 m	100 m	1500 m	6000 m
Amplitude (a)		4000 m	8500 m		4000 m	5000 m
Razão de anisotropia	R ₁ =1 R ₂ =1.7					

**Figura 4.17** - Modelo variográfico da variável primária, ajustado com três estruturas, na direção (-80, 0) (esquerda) e (10, 0) (direita).

4.2.1.2.3. Estimação por *krigagem* simples com médias locais

Os parâmetros selecionados foram os que tinham sido utilizados na *krigagem* ordinária. Apresentam-se, de seguida, os resultados da estimacão secundária, sob a forma de mapa dos valores estimados e variância associada, confrontando com os dados de partida.

**Figura 4.18** - Superfície topo (esquerda) e respetiva variância relativa de estimacão com confrontaco dos dados de partida (direita).

Analisando os resultados obtidos constatou-se o seguinte facto:

(1) O mapa estimado apresenta resultados semelhantes à superfície anteriormente selecionada, o que significa que a variável secundária "*soft data*" foi respeitada. Observam-se alguns artefactos no limite oeste, no entanto tal não se verifica no setor oriental, o foco deste trabalho, não tendo por isso sido considerado um obstáculo. A variância de estimação é nula nos locais amostrados, que coincidem com a localização dos pontos que provêm da *Cartografia detalhada* e *Sísmica*. Na envolvente dos locais amostrados, esta varia gradualmente, aumentando com o incremento da distância aos referidos pontos. Assim, esta é uma estimação que é coerente com os dados de partida, tendo sido considerada uma superfície adequada.

4.2.1.2.4. Validação cruzada

O teste de validação cruzada foi utilizado para avaliar a representatividade deste modelo.

A comparação entre os valores observados e estimados (Figura 4.19) mostra que estes valores são semelhantes entre si.

Os erros das estimações e valores observados correspondentes encontram-se na Figura 4.20, sob a forma de diagrama de dispersão, verificando-se que a nuvem de pontos tende para zero. À semelhança do que se observou na estimação primária, existe também uma tendência de aumento dos erros para valores de cota negativos devido à desproporção na densidade entre amostras que registam estes valores (neste caso, provêm da *Sísmica*) e as amostras que registam valores de cota positivos (essencialmente *Cartografia*). Do ponto de vista estatístico (Tabela 4.7), estes erros variam entre 0 e 189 m, sendo a média 4 m e o erro quadrático médio 32 867 m².

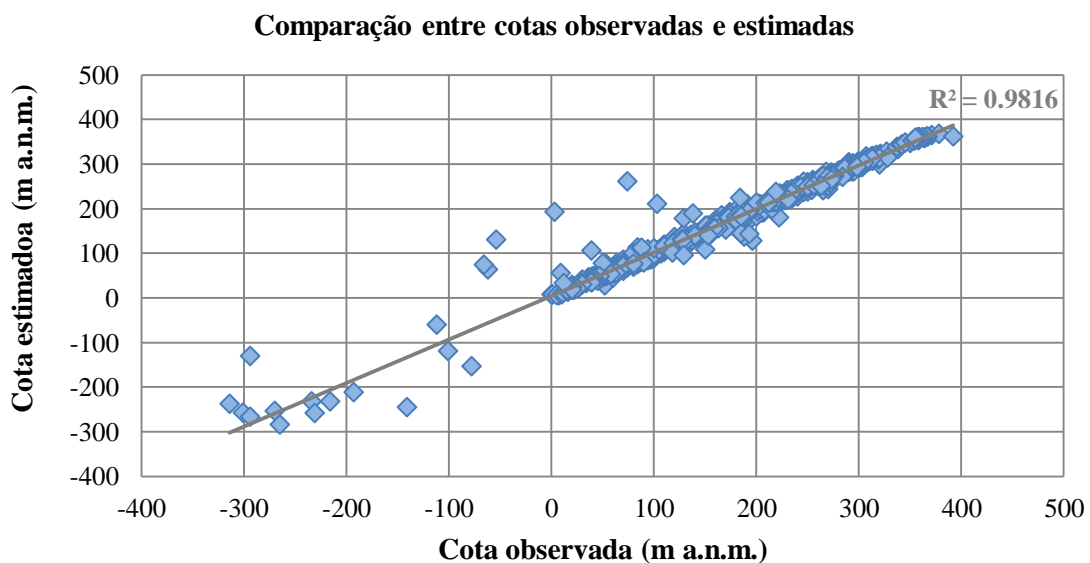


Figura 4.19 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação secundária da unidade 6.

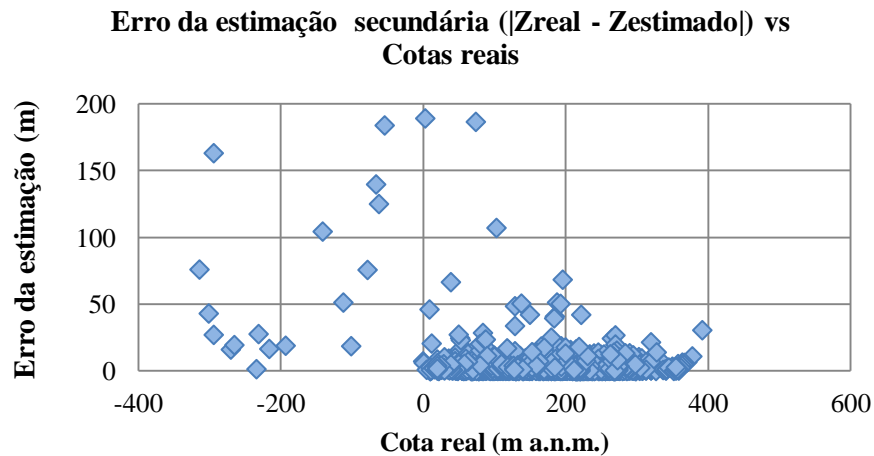


Figura 4.20 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação secundária da unidade 6.

Tabela 4.7 - Estatísticos simples dos erros de estimação secundária da unidade 6.

Erro da estimação secundária (Unidade 6)				
Total de pontos	Mínimo (m)	Máximo (m)	Erro médio (m)	Erro quadrático médio (m ²)
1972	0.0	189.2	4.1	32 867.1

4.2.1.2.5. Análise univariada e retificação da estimação

Em termos estatísticos (Figura 4.21), a estimação por *krigagem* simples com médias locais apresenta uma cota média de -131 m, que está na mesma ordem de grandeza da média dos dados de partida (-172 m). O histograma absoluto mostrou que quase todos os pontos estimados têm valores positivos, o que resulta do facto dos dados de partida "*hard data*" provirem maioritariamente da *Cartografia detalhada*.

Esta estimação resultou num enviesamento do valor máximo, uma vez que o referido valor na situação de partida é de 392 m e na estimação é de 576 m. Por este motivo, foi feita uma retificação da *grid* de modelação, tendo-se verificado que apenas 0.7 % dos pontos necessitavam de ser retificados. Na Figura 4.22 apresenta-se o mapa estimado após a retificação.

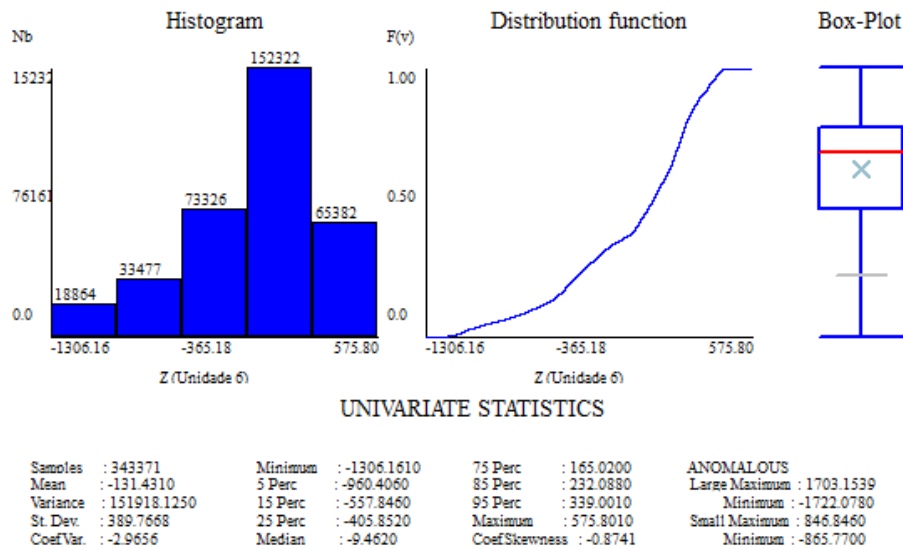


Figura 4.21 - Estatísticos simples da superfície da unidade 6, estimada por *krigagem* simples com médias locais.

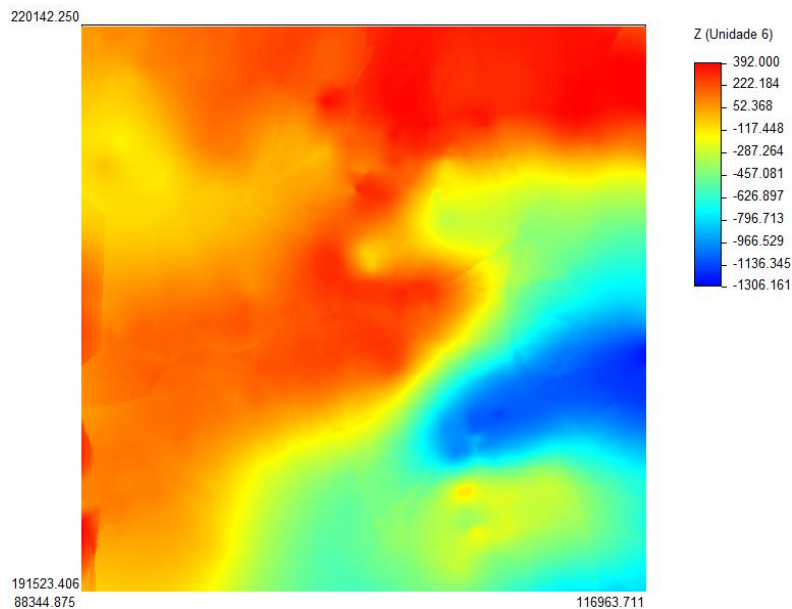


Figura 4.22 - Superfície topo da unidade 6, estimada por *krigagem* simples com médias locais e retificada.

4.2.1.3. Comparação entre os resultados da estimação primária e secundária

A comparação entre os erros da estimação primária e secundária, que se apresenta na Tabela 4.8, permitiu constatar que a superfície gerada na estimação secundária, através de *krigagem* simples com médias locais, é mais adequada à situação em estudo, uma vez que corresponde a um resultado aprimorado da estimação primária.

Como a densidade de pontos amostrados é claramente superior na estimação secundária, consequência de se ter introduzido informação de detalhe, o erro resultante é bastante menor, não ultrapassando os 189 m em contraste com os 354 m que se registam na estimação primária. Também

os valores médios do erro são inferiores na estimação secundária, correspondendo, neste caso, a cerca de 10 % dos valores registados na estimação primária.

Tabela 4.8 - Comparação entre os erros da estimação primária e secundária.

	Erro da estimação	
	Primária	Secundária
Total de pontos	258	1972
Mínimo (m)	0.0	0.0
Máximo (m)	354.2	189.2
Média (m)	41.3	4.1

4.2.2. Unidade litostratigráfica 7-Barremiano-Berriasiano

Como já foi abordado, pretendia-se que a estimação do topo da unidade **7** respeitasse ao máximo os resultados do topo da unidade **6**, tendo-se procedido em primeiro lugar a uma análise da correlação entre estas duas unidades para averiguar a possibilidade de proceder à *co-krigagem* co-localizada.

Para tal, determinou-se o coeficiente de correlação de *Pearson* entre estas duas variáveis, com base em 42 pontos que contêm informação relativa a ambas as unidades e que foram obtidos a partir da interpretação de furos hidrogeológicos e perfis sísmicos. O coeficiente obtido foi de 0.95, um valor significativamente elevado que indica uma excelente correlação entre o topo das unidades **6** e **7**.

O correspondente diagrama de dispersão é apresentado na Figura 4.23, assim como a linha de regressão linear.

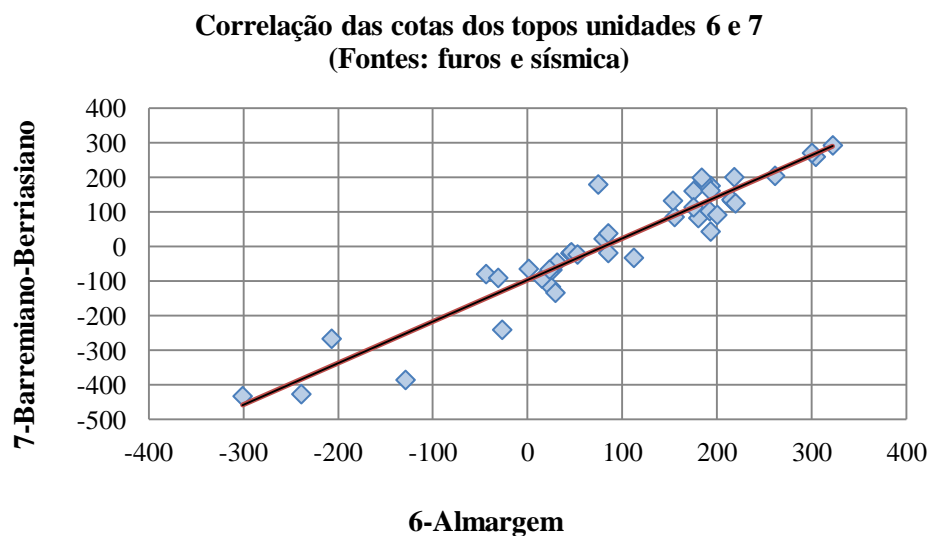


Figura 4.23 - Diagrama de dispersão e linha de regressão linear (de cor vermelha) da correlação entre as cotas dos topos das unidades **6** e **7**.

4.2.2.1. Estimação primária

4.2.2.1.1. Dados de partida

A *co-krigagem* co-localizada foi realizada considerando como variável primária a unidade 7, com base em pontos em que ocorre coexistência desta com a unidade 6. O conjunto de dados tinha origem em:

- *Furos*,
- *Sísmica*
- *Pontos de Controlo* (parcial).

A opção de introduzir apenas parte dos *Pontos de Controlo* está relacionada com a sua malha de amostragem, regular e pouco espaçada, que contrasta com as malhas irregulares e dispersas dos *Furos* e da *Sísmica*. Este ficheiro foi posteriormente retificado, tendo-se introduzido outros pontos auxiliares adicionais para minorar as possíveis dificuldades na modelação, resultantes da carência de pontos amostrados.

Na Figura 4.24 apresenta-se a distribuição espacial dos pontos da variável primária e destaca-se a localização dos dados correspondentes aos *Pontos de Controlo* (parcial) considerados para a modelação inicial da unidade 7.

Para a variável primária, em termos estatísticos (Figura 4.25) observa-se que as cotas variam entre -1200 e 292 m, apresentando uma média de -291 m e variância de 179 118 m².

A variável secundária ou "*soft data*" considerada corresponde com a superfície da unidade 6 estimada por *krigagem* simples com médias locais.

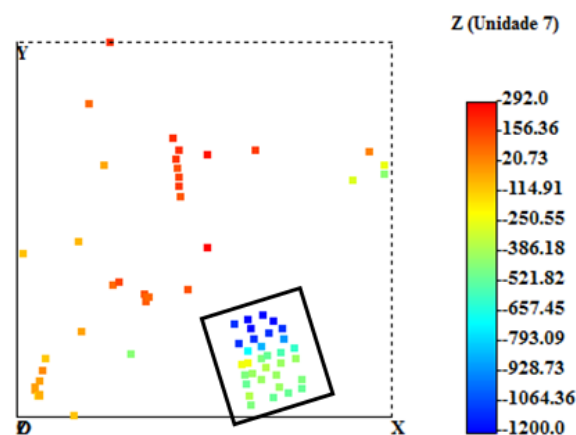


Figura 4.24 - Distribuição espacial dos dados de partida da variável primária, considerados para a estimação primária da unidade 7. Destaque (retângulo) para a localização dos dados dos *Pontos de Controlo* (parcial) na área de amostragem.

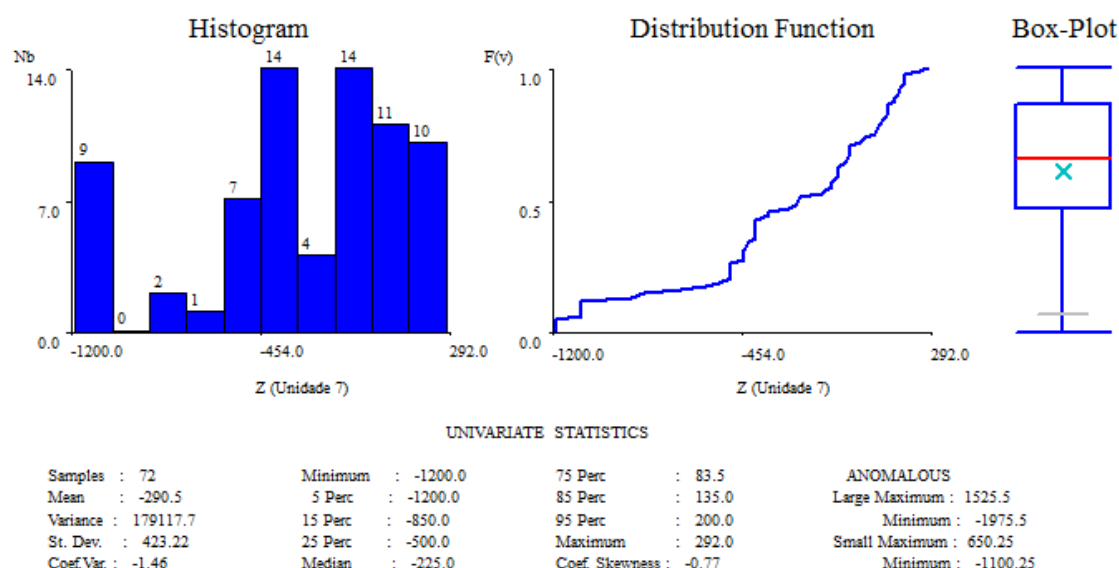


Figura 4.25 - Estatísticos simples dos dados da partida da variável primária, considerados para a estimação primária da unidade 7.

4.2.2.1.2. Análise da continuidade espacial

Neste caso, dada a reduzida abundância de pontos amostrados (veja-se a distribuição na Figura 4.24) considerou-se que seria improvável encontrar estruturas em direções preferenciais, tendo-se tomado a decisão de analisar o comportamento espacial da unidade 7 em termos omnidirecionais. Os parâmetros utilizados foram os que tinham sido considerados nos casos anteriores, ou seja, 14 passos, uma tolerância de 180°, uma distância entre passos de 2000 m e uma distância de corte de 40 000 m.

Tendo em conta os resultados da unidade 6, o ajuste da unidade 7 foi realizado com uma combinação linear de três estruturas, definidas por efeito de pepita, modelo esférico e modelo gaussiano. Foram calculados e ajustados os variogramas da variável primária (7) e cruzada (6 e 7). Na Tabela 4.9 apresentam-se os parâmetros do ajuste e na Figura 4.26 encontram-se os referidos variogramas.

Tabela 4.9 - Parâmetros de modelização variográfica da variável primária e cruzada.

Omnidirecional						
Variável primária (7)				Variável cruzada (6 e 7)		
Estrutura	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)	Estrutura 2 (C_2)	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)	Estrutura 2 (C_2)
Modelo		Esférico	Gaussiano		Esférico	Gaussiano
Patamar (C)	100 m	10 000 m	170 000 m	100 m	10 000 m	161 000 m
Amplitude (a)		3000 m	6500 m		3000 m	6500 m

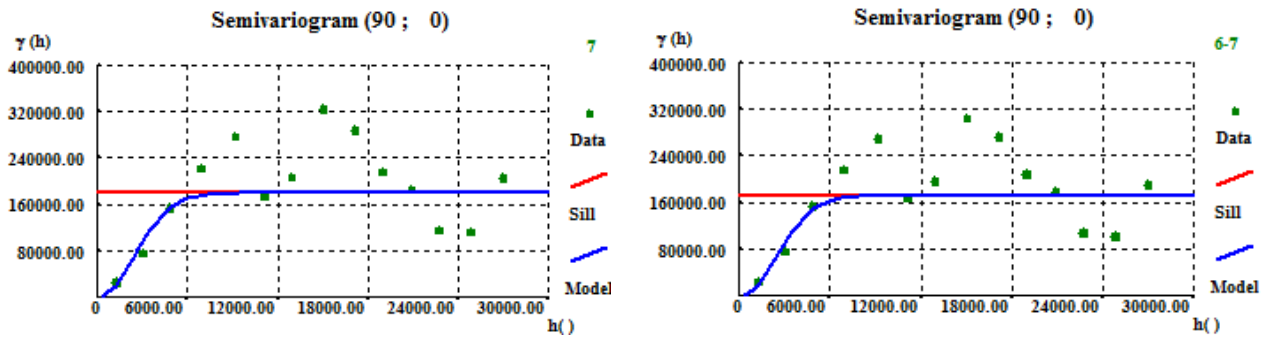


Figura 4.26 - Modelos variográficos, ajustados com três estruturas, da variável primária (esquerda) e secundária (direita).

4.2.2.1.3. Estimação por co-krigagem co-localizada

Numa primeira fase, o estimador co-krigagem co-localizada foi utilizado para gerar o topo da unidade 7, tendo-se considerado os mesmos parâmetros, já descritos para a unidade 6 (subcapítulo 4.2.1.1.3.). Na Figura 4.27 encontram-se os resultados da estimacão primária: mapa dos valores estimados e variância associada, confrontando com os dados de partida.

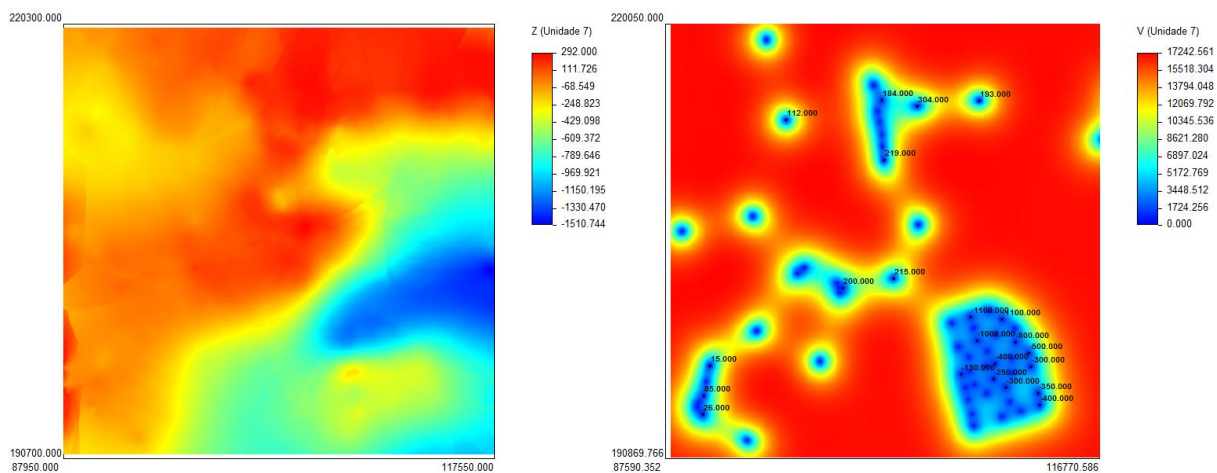


Figura 4.27 - Superfície topo estimada por co-krigagem co-localizada (esquerda) e respetiva variância de estimacão com confrontaco dos dados de partida (direita).

Os resultados obtidos permitiram constatar os seguintes factos:

- (1) A superfície da unidade 7, gerada por co-krigagem co-localizada com base no variograma omnidirecional em que se assumiu a existência de três estruturas, mostra-se coerente com os resultados da unidade 6, refletindo o andamento das cotas desta última, embora com valores tendencialmente mais profundos, como seria de esperar.  semelhança da superfície utilizada como "soft data", este mapa de estimacão apresenta alguns artefactos, mais pronunciados no bordo oeste, o que não foi considerado um obstáculo atendendo ao facto de estar afastado do setor oriental, o foco do presente trabalho.

(2) Relativamente à variância, embora se afaste dos patamares das variáveis (cerca de 17 000 m² e 170 000 m², respetivamente), verifica-se que nos locais que têm pontos amostrados aproxima-se de zero, indicando que aí a incerteza é reduzida e aumenta na sua envolvente. Embora tenha associada alguma incerteza, esta estimação é coerente com os dados de partida tendo sido considerada uma superfície adequada, a utilizar nas próximas etapas.

4.2.2.1.4. Validação cruzada

A comparação entre os valores observados e estimados (Figura 4.28) mostra alguma dispersão, ainda que reduzida, em torno da bisetriz..

Na Figura 4.29 apresenta-se o diagrama de dispersão entre os erros das estimações e valores observados correspondentes. Estes erros variam entre 1 e 371 m, sendo a média 73 m e o erro quadrático médio 383 826 m² (Tabela 4.10).

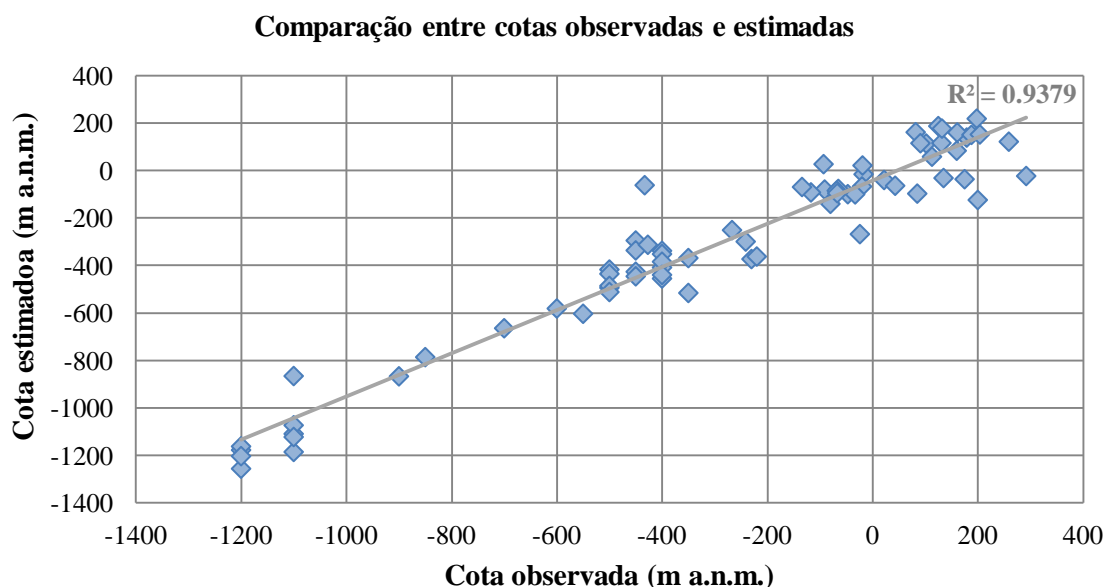


Figura 4.28 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação primária da unidade 7.

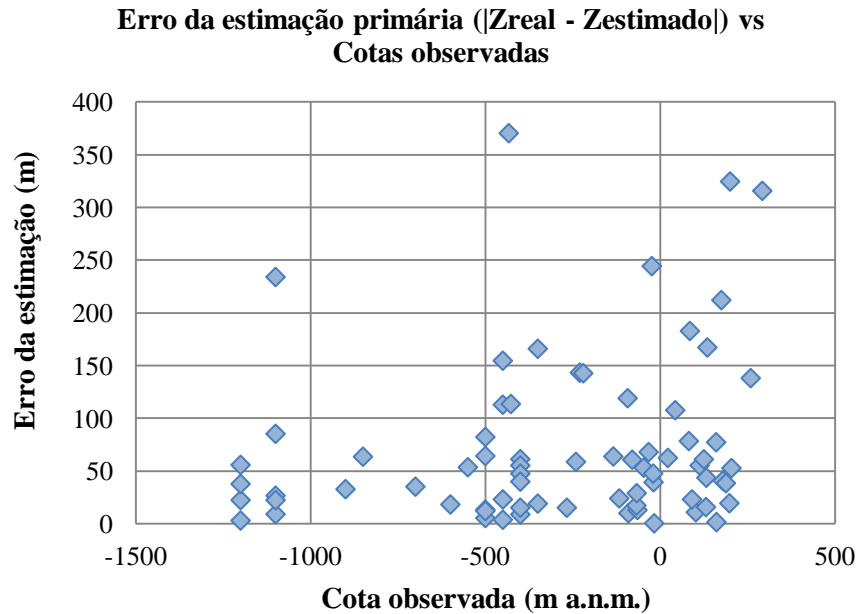


Figura 4.29 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação primária da unidade 7.

Tabela 4.10 - Estatísticos simples dos erros de estimação primária da unidade 7.

Erro da estimação primária (Unidade 7)				
Total de pontos	Mínimo (m)	Máximo (m)	Erro médio (m)	Erro quadrático médio (m ²)
72	0.6	370.5	73.0	383 825.8

4.2.2.1.5. Análise univariada e retificação da estimação

Nesta fase procedeu-se a uma análise univariada preliminar dos valores estimados (Figura 4.30) para conhecer o seu comportamento estatístico e comparar com os dados de partida, tendo-se considerado a média, o mínimo e o máximo. Os valores estimados apresentam uma média de -271 m, estando na mesma ordem de grandeza dos valores de partida (-291 m). Novamente, verifica-se pela observação do histograma absoluto, que a maior parte dos pontos estimados apresenta valores positivos, o que é uma consequência da variável secundária "*soft data*" utilizada.

Os resultados não são enviesados, verificando-se que o máximo estimado tem o mesmo valor dos dados de partida (292 m) e o mínimo estimado é de -1511 m, um valor que embora ultrapasse o correspondente nos dados de partida (-1200 m), é coerente com os o conhecimento que se tem da situação em estudo. Deste modo, esta estimação não necessita de ser retificada.

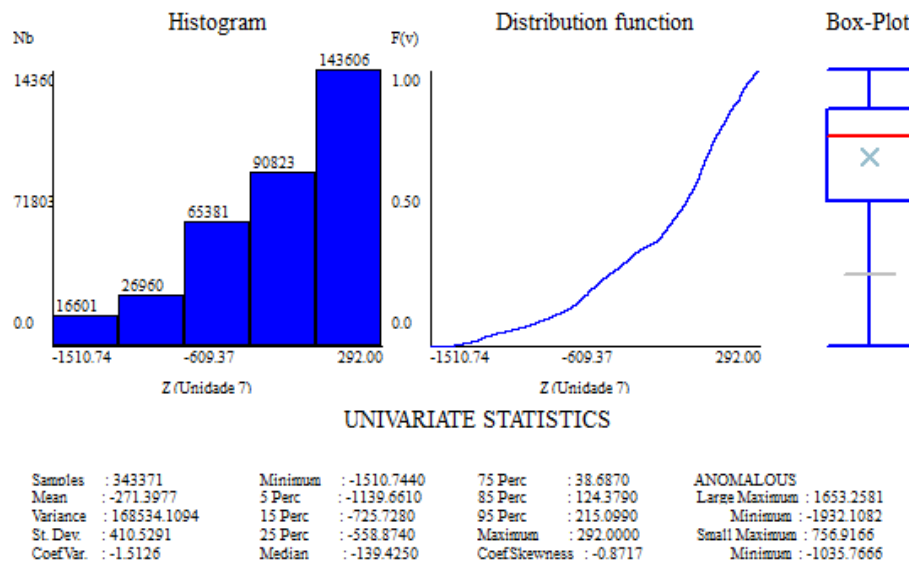


Figura 4.30 - Estatísticos simples da superfície da unidade 7, estimada por co-krigagem co-localizada.

4.2.2.2. Estimação secundária

4.2.2.2.1. Dados de partida

A variável secundária ou "*soft data*" considerada corresponde com a superfície anteriormente estimada por co-krigagem co-localizada.

A variável primária ou "*hard data*" foi o conjunto de dados que produziu o melhor resultado, aproximando-se mais da realidade. Neste caso introduziu-se informação de:

- *Furos*,
- *Sísmica*,
- *Pontos de Controlo* (Total),
- *Cartografia simplificada*.

Na Figura 4.31 apresenta-se a distribuição espacial dos referidos pontos.

Do ponto de vista estatístico (Figura 4.32) as cotas estão compreendidas entre -1500 e 386 m, sendo a média -189 m. A variância é de 240 628 m², correspondendo aos ~491 m de desvio padrão, que significa que os valores se afastam bastante da média.

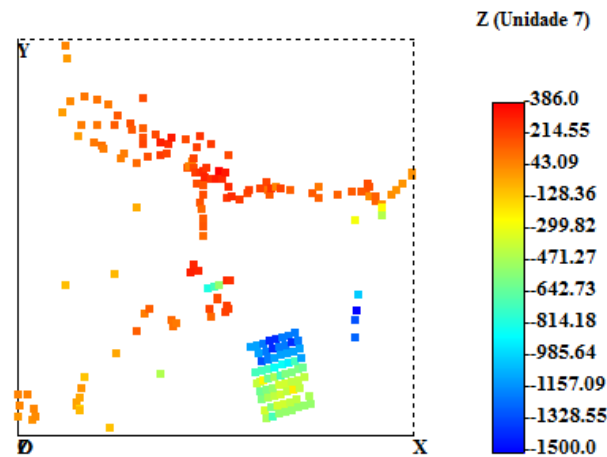


Figura 4.31 - Distribuição espacial dos dados de partida "hard data", considerados para a estimação secundária da unidade 7.

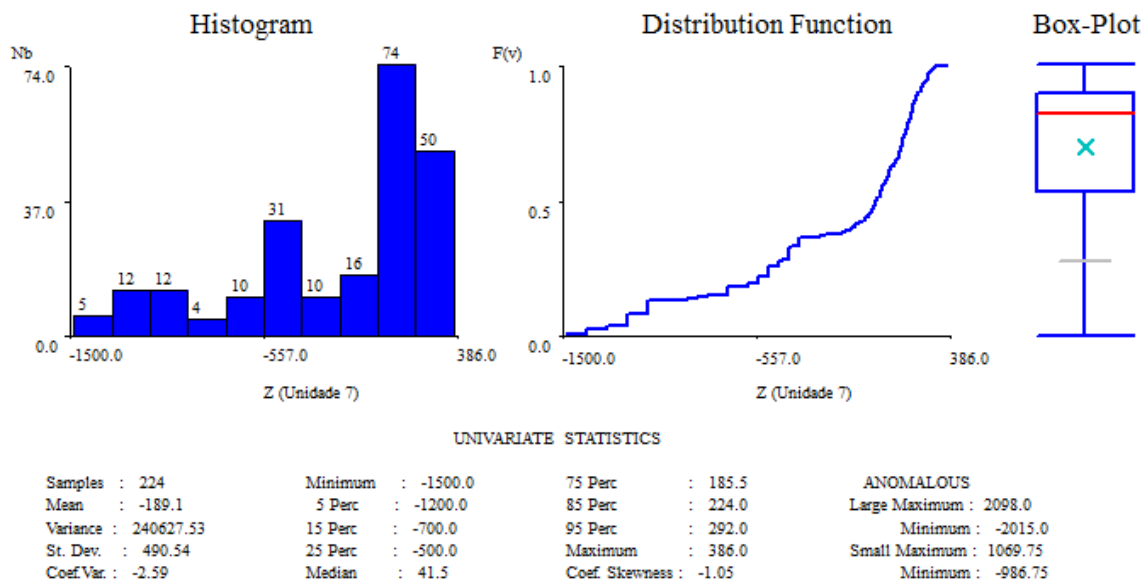


Figura 4.32 - Estatísticos simples dos dados de partida "hard data", considerados para a estimação secundária da unidade 7.

4.2.2.2.2. Estimação por krigagem simples com médias locais

À semelhança da situação anterior, os parâmetros utilizados foram 14 passos, uma tolerância de 180°, uma distância entre passos de 2000 m e uma distância de corte de 40 000 m, tendo-se optado pelo variograma omnidirecional, que foi ajustado de acordo com os parâmetros indicados na Tabela 4.11. Na Figura 4.33 apresenta-se o variograma estabilizado.

Tabela 4.11 - Parâmetros de modelização variográfica omnidirecional, com três estruturas, da variável primária.

Omnidirecional			
Estrutura	Efeito de pepita (C_0)	Estrutura 1 (C_1)	Estrutura 2 (C_2)
Modelo		Esférico	Gaussiano
Patamar (C)	100 m	14 000 m	228 000 m
Amplitude (a)		4000 m	10 000 m

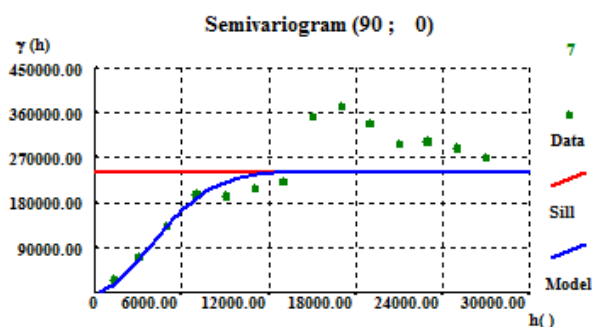


Figura 4.33 - Modelo variográfico omnidirecional da variável primária, ajustado com três estruturas.

4.2.2.2.3. Estimação por *krigagem* simples com médias locais

Os resultados da estimaco secundária (mapa dos valores estimados e variância associada, confrontando com os dados de partida) so apresentados na Figura 4.34.

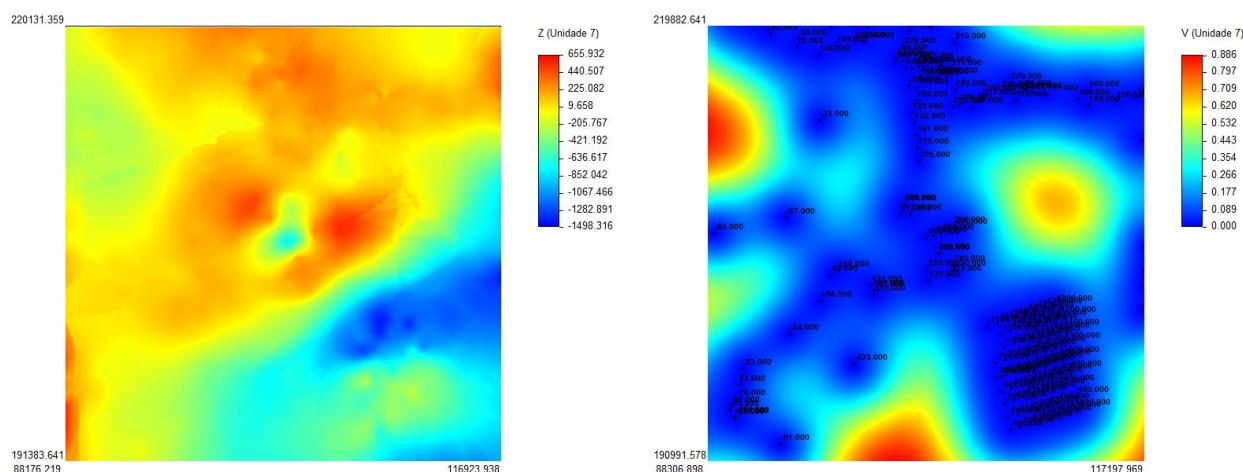


Figura 4.34 - Superfície topo estimada por *krigagem* simples com médias locais (esquerda) e respetiva variância relativa de estimaco com confrontaco dos dados de partida (direita).

Analisando os resultados obtidos:

(1) No setor oriental da área em estudo, o foco do trabalho, verifica-se que o mapa estimado é semelhante à superfície anteriormente gerada por *co-krigagem* co-localizada. Na restante área, observam-se algumas diferenças que estarão relacionadas com enviesamentos desta estimação. Destaca-se a ocorrência de cotas muito elevadas (representadas pelos tons avermelhados) separadas, na zona central, por cotas reduzidas (tons esverdeados a azulados), o que é consequência de *Pontos de Controlo* que foram introduzidos com base em cortes geológicos (ver subcapítulo 3.2.2.); efetivamente verifica-se que, precisamente nesse local, existe uma falha.

(2) A variância é praticamente nula nos locais amostrados e na sua envolvente, indicando que aí a incerteza é reduzida.

4.2.2.2.4. Validação cruzada

Na Figura 4.35 encontra-se a comparação entre os valores observados e estimados, que apresenta uma dispersão reduzida em torno da bissetriz.

Na Figura 4.36 mostra-se o diagrama de dispersão entre os erros e valores observados. Do ponto de vista estatístico (Tabela 4.12), estes erros variam entre 0 e 492 m, apresentando um valor médio de 67 m e um erro quadrático médio de 963 730 m².

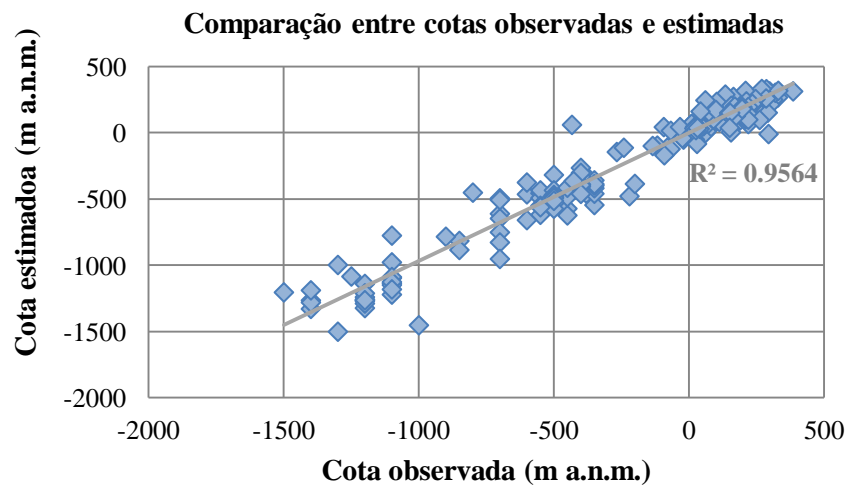


Figura 4.35 - Comparação entre cotas observadas e estimadas na estimação secundária da unidade 7.

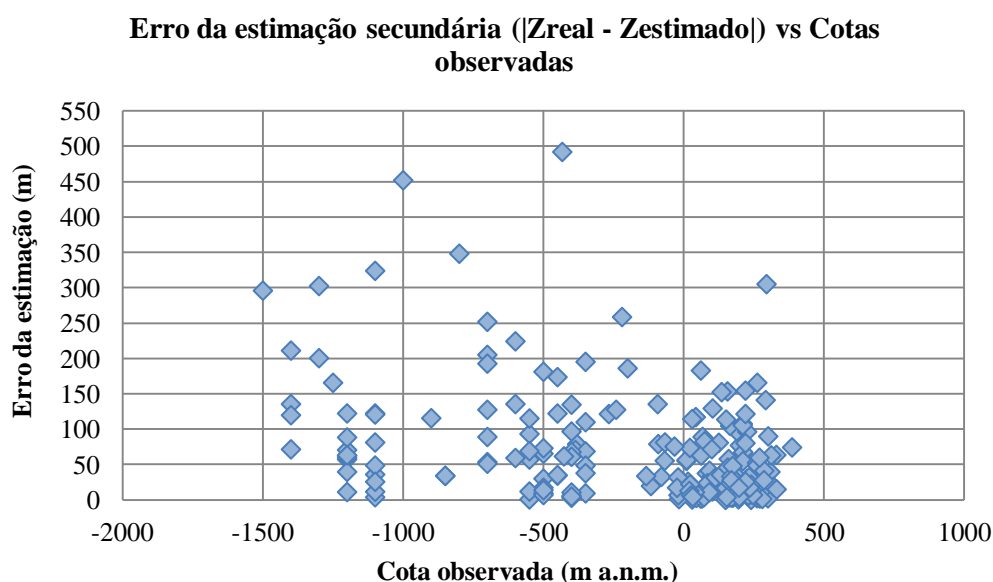


Figura 4.36 - Valores de cota observados e correspondentes erros da estimação secundária da unidade 7.

Tabela 4.12 - Estatísticos simples dos erros de estimação secundária da unidade 7.

Total de pontos	Erro da estimação secundária (Unidade 7)			
	Mínimo (m)	Máximo (m)	Erro médio (m)	Erro quadrático médio (m ²)
224	0.1	492.1	67.1	963 729.9

4.2.2.2.5. Análise univariada e retificação da estimação

Do ponto de vista estatístico (Figura 4.37), a estimação por *krigagem* simples com médias locais apresenta uma cota média de -221 m, próxima da média dos dados de partida (-189 m). Observa-se um enviesamento do valor máximo estimado (656 m), cujo valor correspondente na situação de partida era de 386 m. Por esta razão, procedeu-se à retificação da *grid* de modelação, tendo-se verificado que apenas 1.4 % dos valores careciam de retificação. Na Figura 4.38 encontra-se o mapa estimado após a retificação.

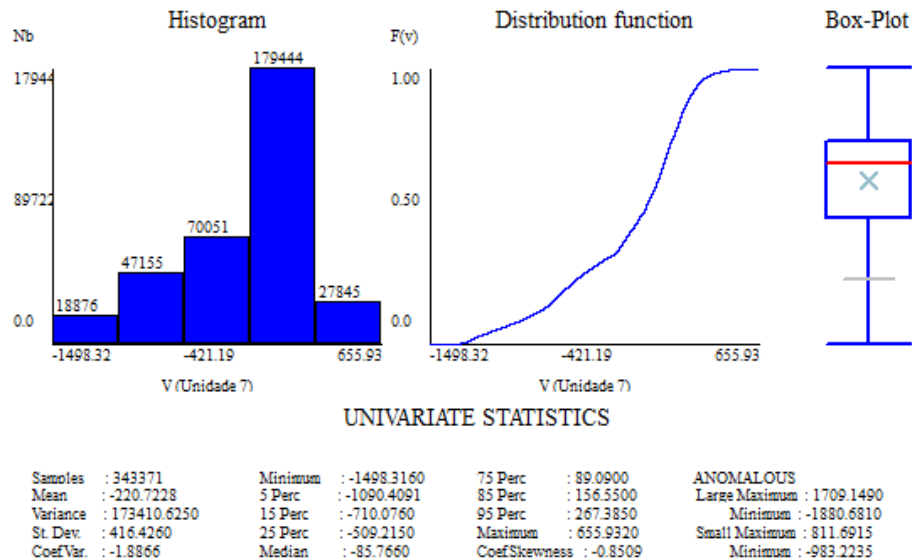


Figura 4.37 - Estatísticos simples da superfície da unidade 7, estimada por *krigagem* simples com médias locais.

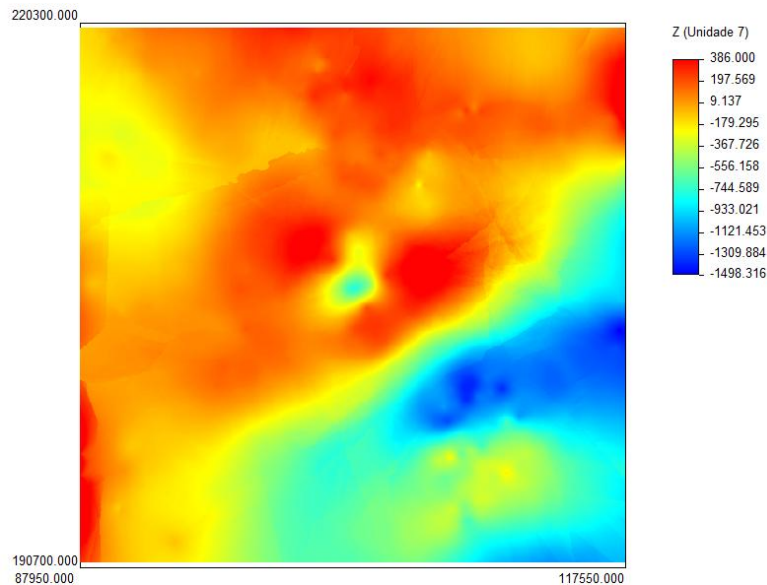


Figura 4.38 - Superfície topo da unidade 7, estimada por *krigagem* simples com médias locais e retificada.

4.2.2.3. Comparação entre os resultados da estimação primária e secundária

A comparação entre os erros da estimação primária e secundária encontra-se na Tabela 4.13. Também neste caso, a densidade de pontos é superior na estimação secundária. O erro mínimo é menor na estimação secundária (0.1 m) do que na estimação primária (0.6 m), assim como a média dos erros (67 m e 73 m, respetivamente), embora sejam valores que se apresentam na mesma ordem de grandeza. No entanto, os erros atingem valores de máximo superiores na estimação secundária (492 m), um valor significativo. Por este motivo, considerou-se que a superfície gerada por *krigagem* simples com médias locais não é adequada à situação em estudo, uma vez que não foi cumprido o objetivo de obter um aprimoramento da estimação anterior. Deste modo, a superfície resultante da co-

krigagem co-localizada (estimação primária) é o melhor modelo, sendo mais adequada à situação em estudo.

Tabela 4.13 - Comparação entre os erros da estimação primária e secundária.

	Erro da estimação	
	Primária	Secundária
Total de pontos	72	224
Mínimo (m)	0.6	0.1
Máximo (m)	370.5	492.1
Média (m)	73.0	67.1

4.3. Visualização 3D e validação

As superfícies geradas e selecionadas dos topos das unidades litostratigráficas **6** e **7** foram importadas para o *ArcScene* para se proceder à visualização tridimensional (3D) e validação do modelo.

Os ficheiros resultantes das estimações são constituídos por pontos com coordenadas *x*, *y* e *z*, sendo esta última a variável modelada. A visualização foi obtida pela conversão dos pontos numa *grid* ou *raster*, apresentando-se as mesmas na direção N-S, com elementos de referência geográfica na Figura 4.39.

A validação do modelo foi conseguida mediante a confrontação da visualização 3D com o conhecimento que se tem da realidade, expresso quer pelos dados de partida, quer por outras informações que não foram consideradas na modelação, nomeadamente dados topográficos, geológicos e geofísicos da área de estudo.

Na Figura 4.40 mostra-se a sobreposição dos afloramentos da cartografia geológica na escala 1: 50 000 com a superfície topo da unidade **6**, apresentando-se ampliações para a zona de maior interesse do presente trabalho, o setor oriental, na Figura 4.41. No referido setor, à superfície, é clara a ocorrência de unidades litostratigráficas mais recentes que as consideradas para a modelação, definindo o preenchimento sedimentar que conduz ao afundamento destas últimas e que contribui para o aumento do seu potencial geotérmico.

A confrontação entre as superfícies e os correspondentes dados de partida encontra-se na Figura 4.42. Nesta fase importa referir que, no futuro, deverão ser eliminados todos os pontos que foram estimados acima da cartografia, uma vez que esses não respeitam os limites estratigráficos conhecidos.

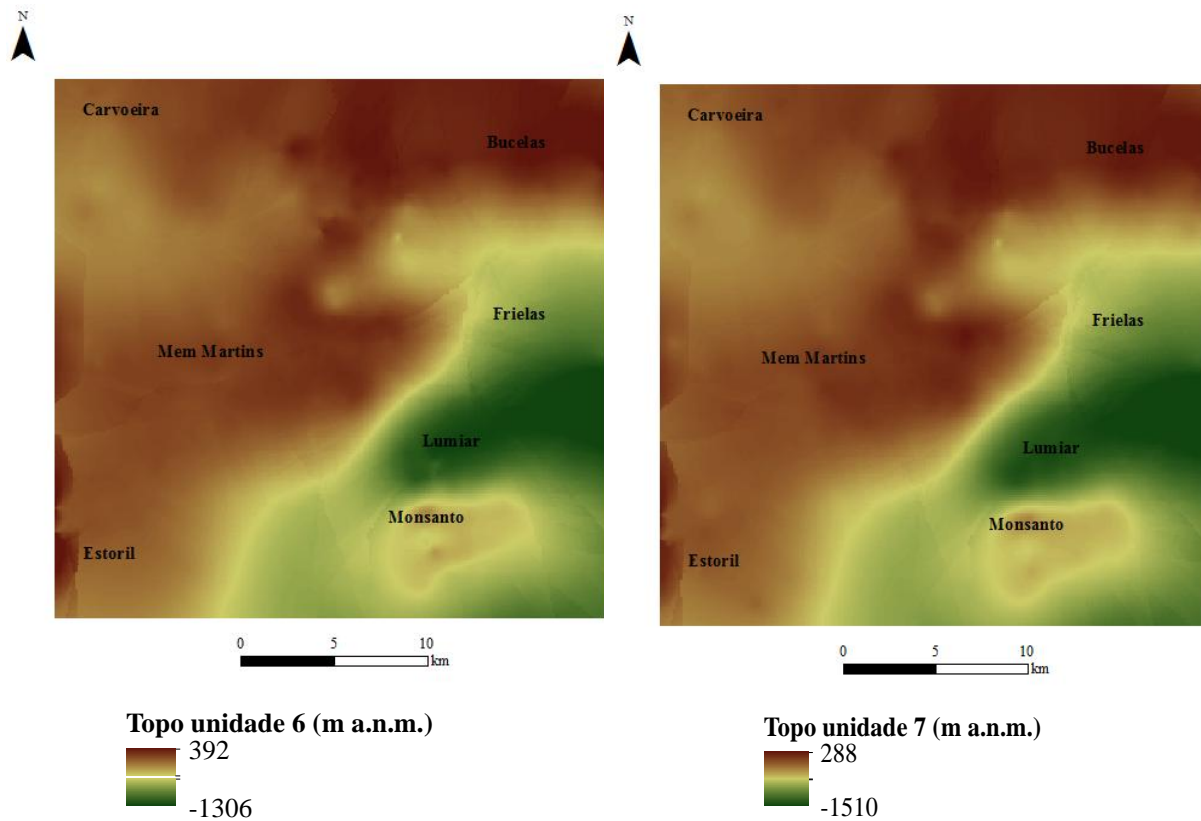


Figura 4.39 - Visualização planar das *grids* geradas na direção N-S, correspondentes aos modelos que produziram os melhores resultados da unidade 6 (esquerda) e 7 (direita).

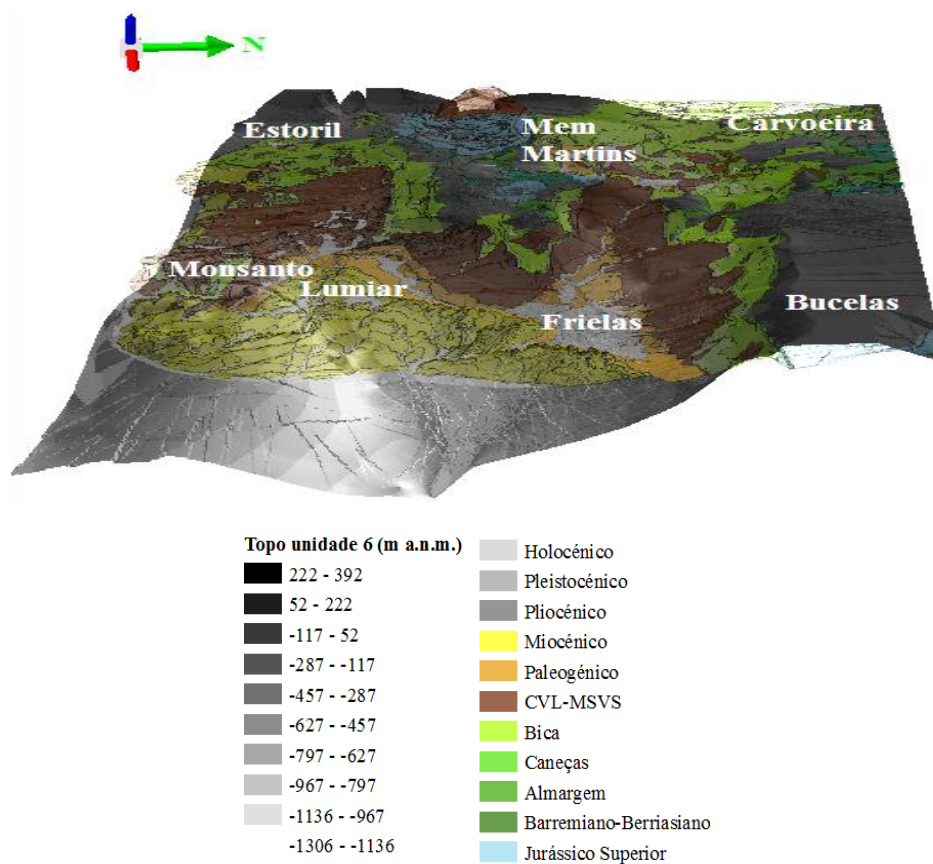


Figura 4.40 – Sobreposição 3D da cartografia geológica na escala 1: 50 000 com a superfície correspondente ao modelo que produziu o melhor resultado do topo da unidade 6. Fator de exagero vertical: 5.

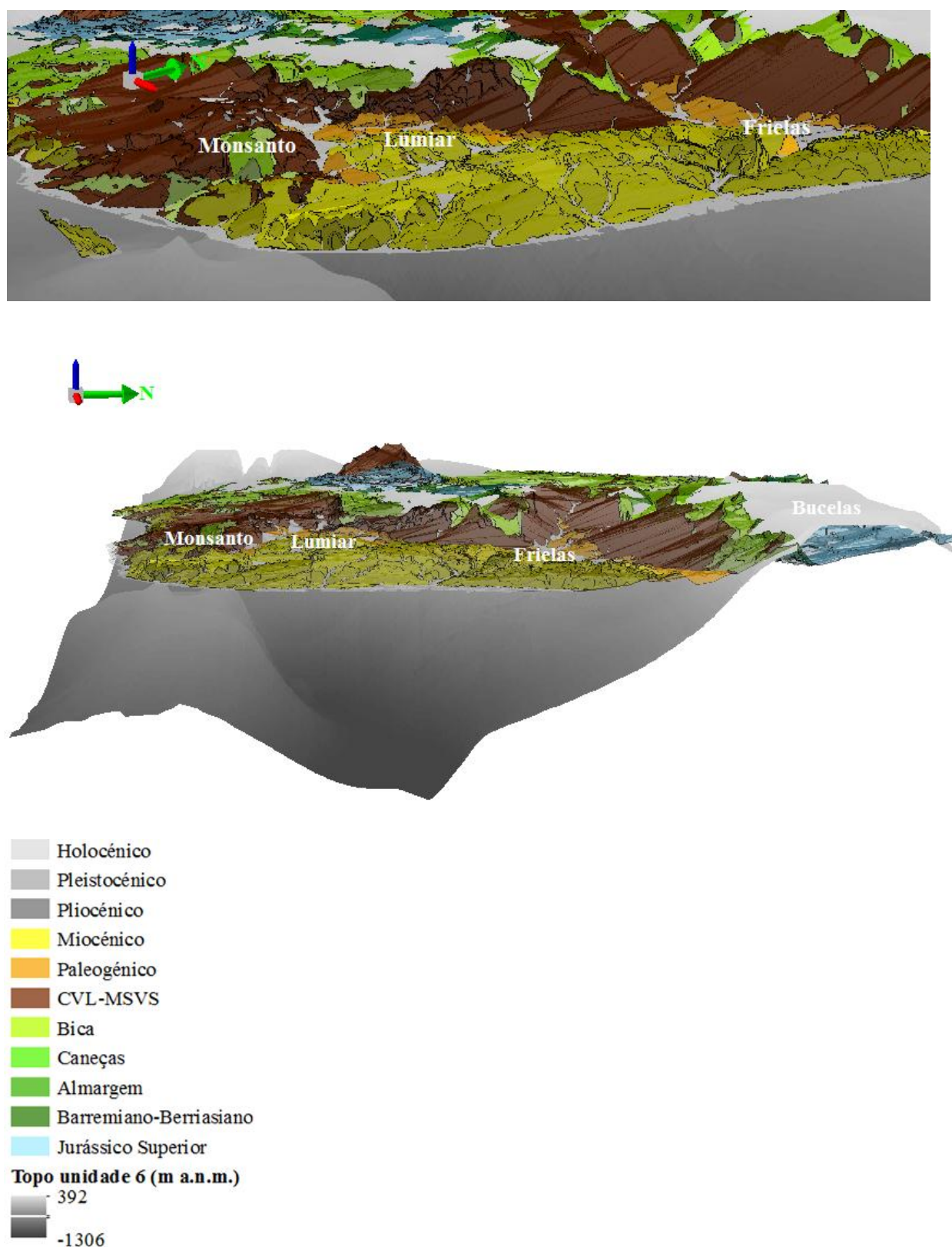


Figura 4.41 – Ampliação do setor oriental da área de estudo e sobreposição 3D da cartografia geológica na escala 1: 50 000 com a superfície correspondente ao modelo que produziu o melhor resultado da unidade 6, nas direções ENE-WSW (**acima**) e E-W (**abaixo**). Fator de exagero vertical: 5.

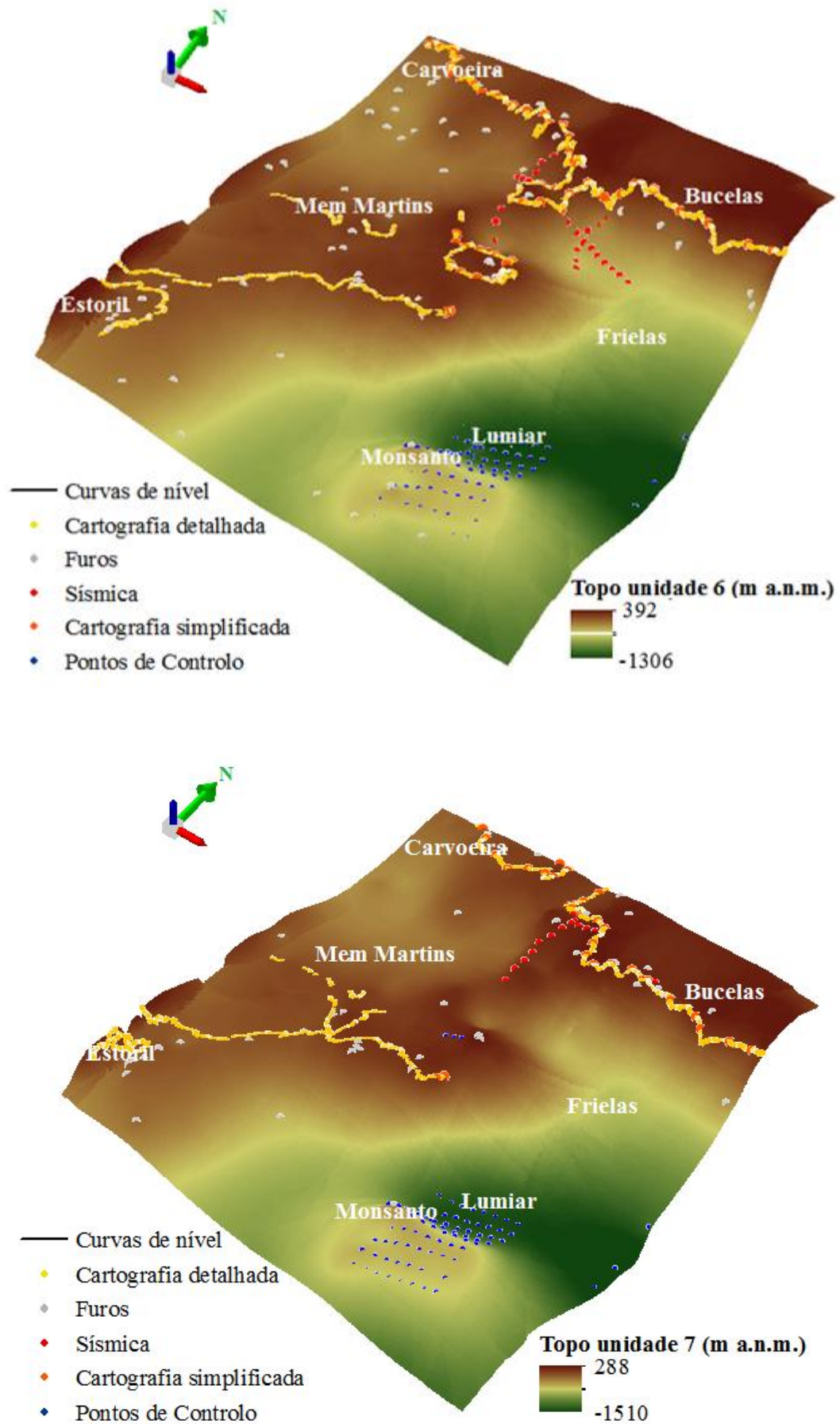


Figura 4.42 - Visualização 3D, na direção NE-SW, das *grids* correspondentes ao modelos que produziram os melhores resultados da unidade 6 (acima) e 7 (abaixo), confrontando com a informação de partida. Fator de exagero vertical: 5.

Atendendo a que o campo considerado para a modelação é muito extenso (858.4 km²), é natural que os modelos não representem todas as estruturas geológicas existentes. Ainda assim, as superfícies geradas refletem a tendência regional e geral de andamento das cotas para os topos das unidades **6** e **7**, sendo úteis para melhorar a compreensão da geometria subsuperficial na área em estudo.

A observação das duas superfícies permite constatar que a tendência de andamento das cotas nas duas unidades é semelhante, embora na **7** se atinjam valores mais profundos, como se esperava e faz sentido, tendo em conta a sequência estratigráfica.

Existem zonas pontuais em que tal não acontece, nomeadamente as zonas de menor espessura, próximas de afloramentos. Esta situação deverá ser corrigida, suavizando a superfície modelada. Idealmente, com a construção de um modelo num *software* indicado para uma abordagem geométrica 3D, mais próxima da realidade, esta e outras situações poderão ser aprimoradas.

O setor oriental, onde se focou essencialmente a modelação, corresponde a uma área urbana, em que existe pouca informação em profundidade. Efetivamente, até agora não foi desenvolvida nenhuma campanha de sísmica profunda, pelo que o conhecimento da geologia das formações mais profundas neste setor é limitado.

Tendo em conta que a unidade **6** é a mais interessante para o presente trabalho, nesta etapa foi feita uma análise mais pormenorizada desta na setor oriental. Foi então possível constatar a existência de zonas muito profundas (representadas pelos tons verdes), observando-se mesmo uma zona de profundidade máxima que corresponde a um sinclinal que tem a charneira próxima do furo AC1-BALUM (Figura 4.43), o que é coerente com os cortes geológicos que existem nesta zona.

Por outro lado, observa-se também a existência de zonas de cotas elevadas, correspondentes a altos topográficos. Foi inclusivamente representado o anticlinal de Monsanto (de tons amarelo a acastanhados, na Figura 4.43), que também está em concordância com os dados que se conhecem nessa zona.

A proximidade destas duas dobras pode ser explicada pela presença de uma ou várias falhas importantes, como já é referido nas cartas geológicas a diversas escalas. Desta forma, foi possível complementar a falta de informação em profundidade nesta zona em particular.

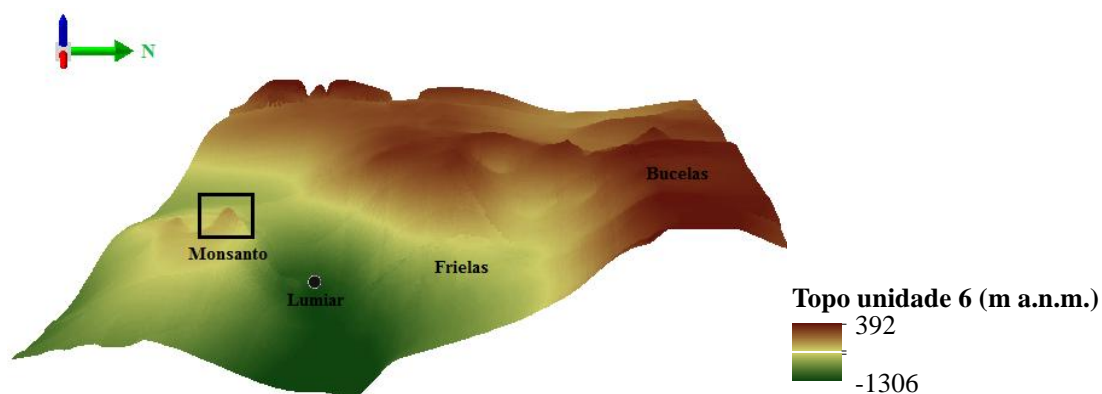


Figura 4.43 - Visualização da *grid* gerada a 3D, correspondente ao modelo que permitiu os melhores resultados da unidade 6, com a localização do furo AC1-BALUM (representado pelo ponto) e do anticlinal de Monsanto (destacado pelo retângulo). Fator de exagero vertical: 5.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado na presente tese permitiu desenvolver uma metodologia de apoio à modelação geológica tridimensional (3D) em que foi obtida uma representação válida da geometria subsuperficial de uma unidade litostratigráfica, relevant em termos geotérmicos, na região de Lisboa. Para atingir os resultados, foram considerados, simultaneamente e segundo um processo sequencial de estimação geoestatística, dados obtidos a partir de fontes distintas e que se expressam segundo níveis de detalhe igualmente distintos, nomeadamente de levantamentos de cartografia geológica, da interpretação de dados hidrogeológicos e ainda da interpretação de perfis sísmicos de reflexão.

A integração de informação relativa à cota de unidades litostratigráficas, com origens diferentes e numa área geográfica abrangente, constituiu o principal desafio deste trabalho, devido à elevada heterogeneidade na densidade e distribuição espacial dos dados. A metodologia descrita neste trabalho foi repartida em três grandes etapas: construção da base de dados, processamento dos dados e modelação geoestatística.

A construção da base de dados pressupôs a realização de várias tarefas, nomeadamente o levantamento e seleção da informação, tendo-se seguido a sua organização e georreferenciação. Posteriormente, foi efetuada a análise, interpretação e tratamento dos dados selecionados, tendo-se numa primeira fase dividido as formações da área em estudo em 8 unidades litostratigráficas e considerado a unidade **6-Almargem** como prioritária para as fases subsequentes, devido às suas propriedades geotérmicas.

Os dados selecionados foram integrados numa única base de dados com elementos geológicos (cartografia nas escalas 1: 50 000), hidrogeológicos (furos de captação de águas subterrâneas) e geofísicos (sísmica de reflexão). A base de dados foi refinada, tendo-se mantido apenas os pontos considerados representativos para a modelação, quer em termos espaciais quer pela qualidade associada.

Na sequência estratigráfica, a unidade **7-Barremiano-Berriasiano** é subjacente à **6**, sendo expectável que apresente profundidades superiores. Como tal, para a modelação selecionaram-se apenas os topos das unidades **6** e **7**, resultando numa aproximação de um modelo da unidade **6**. Esta apresenta-se mais profunda no setor oriental da área em estudo, estando-lhe associado um maior potencial geotérmico, o que levou a que o referido setor tenha sido o principal foco do presente trabalho.

A modelação foi dificultada pela diversidade de informação com origens distintas existente, o que implicou que as escalas, espaçamentos e malhas de pontos apresentassem consideráveis diferenças. Daí resultou uma elevada desproporção na densidade, bem como na distribuição espacial dos pontos e respetiva variabilidade. Consequentemente foi indispensável a experimentação de várias tentativas de processamento dos dados.

O processamento dos dados foi realizado de modo iterativo, em sucessivas etapas de eliminação e introdução de novos pontos, conjugando o conhecimento pericial da situação em estudo com os

resultados que foram surgindo, até se ter atingido um resultado que melhor se ajusta à realidade. No entanto, dada a elevada dependência que os modelos têm em relação ao *input*, salienta-se a necessidade de constante melhoria da base de dados para assegurar o melhor modelo possível.

A modelação geoestatística permitiu a inferência espacial da cota dos topos das unidades litostratigráficas **6** e **7**, tendo sido primeiramente realizada modelização variográfica. Os modelos de variograma que consideram diferentes estruturas são os que conduziram a resultados de modelação mais fidedignos.

Tendo como meta final a integração, de modo sequencial, nos modelos 3D, de informação com naturezas distintas, consideraram-se os métodos de estimação disponíveis mais prementes na metodologia de modelação geoestatística adotada, de modo a produzir os melhores resultados. Numa fase experimental foram testadas algumas alternativas, tendo-se constatado que o sucesso da adoção dos métodos depende da natureza intrínseca do conjunto de dados de partida a utilizar, devendo ser sempre ponderada a sua aplicação numa perspetiva cuidadosa de “caso a caso”.

A *krigagem* ordinária gerou uma possível superfície geométrica correspondente ao topo da unidade **6**, a mais interessante para o estudo. Atendendo à elevada correlação entre as unidades **6** e **7**, utilizou-se a *co-krigagem* co-localizada para impor que a estimação do topo desta última unidade respeitasse os resultados anteriores. Optou-se ainda pela *krigagem* simples com médias locais para introduzir informação mais pormenorizada e gerar uma superfície aprimorada em ambas as unidades.

A validação cruzada permitiu avaliar a representatividade dos modelos gerados, tendo-se constatado que, no caso da unidade **6**, a superfície mais adequada foi a que resultou da *krigagem* simples com médias locais; já no caso da unidade **7**, a superfície mais coerente com a situação em estudo foi resultado da *co-krigagem* co-localizada.

No setor oriental da área em estudo, em que as necessidades energéticas são elevadas e onde se espera que as unidades litostratigráficas apresentem maior profundidade (e portanto, maior potencial geotérmico), existia uma escassa quantidade de dados. Com a representação da geometria das unidades **6** e **7** foi possível visualizar a tendência regional de andamento das suas cotas.

A motivação para o desenvolvimento do trabalho apresentado foi a identificação das áreas com maior potencial geotérmico na região de Lisboa, mas de facto os resultados obtidos são passíveis de ser aplicados em vários domínios das geociências, como sejam a geologia estrutural, hidrogeologia, armazenamento de CO₂, entre outros.

A metodologia descrita na presente tese mostrou a importância dos dados de partida, bem como do seu processamento e de várias técnicas de modelação geoestatística, para a futura construção de um modelo geológico 3D. É importante salientar a indiscutível necessidade de ser feito um distanciamento sistemático entre o modelo e a realidade, o que implica muitas vezes alterações que conduzem a melhorias nos dados de partida, para ser possível a validação das escolhas adotadas. Por último, é de referir o carácter dinâmico desta metodologia, que no futuro poderá vir a ser aperfeiçoada e adotada a outras aplicações.

Perspetivas de possíveis trabalhos futuros

Os resultados obtidos cumprem o objetivo proposto, no entanto podem ser melhorados com a realização das seguintes tarefas:

- Eliminação dos pontos estimados acima da cartografia;
- Estimação de superfícies correspondentes aos topos das outras unidades litostratigráficas selecionadas;
- Validação aprimorada do modelo, cruzando-o com mais superfícies de topos e com topografia;
- Introdução de componente estrutural, fundamental ao desenvolvimento de um modelo geológico a 3D, considerando-se unidades cartográficas estruturais que sejam válidas e aplicáveis para a área em estudo e subjugando-se as superfícies geradas a tais unidades. Neste contexto, poderá ser útil explorar a utilização das superfícies obtidas, como tendências regionais, para a modelação local e condicionada às componentes estruturais entretanto estabelecidas;
- Trabalhar toda a informação em *software* que permitam a representação a 3D de superfícies, conjugando-as com a interpretação estrutural e efetuando os necessários constrangimentos em termos das respetivas unidades estruturais previamente estabelecidas na área a modelar; salienta-se, neste contexto, as potencialidades do *software MoveTM*, devido às suas especificidades em modelação geológica geometricamente constrangida.

6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Almeida, C., Carvalho, M. R., Almeida, S. (1991). Modelação de Processos Hidrogeoquímicos Ocorrentes nos Aquíferos Carbonatados da Região de Lisboa-Cascais-Sintra. *Hidrogeologia e Recursos Hidráulicos*, XVII: 289-304.
- Almeida, C., Mendonça, J.J.L., Jesus, M.R., Gomes, A.J. (2000). Actualização do Inventário dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água, vol. 1 e 2.
- Alves, T. M., Manuppella, G., Gawthorpe, R. L., Hunt, D. W., Monteiro, J. H. (2003). The depositional evolution of diapir- and fault-bounded rift basins: examples from the Lusitanian Basin of West Iberia. *Sedimentary Geology*, 162: 273-303.
- Baldé, G. (2012). Modelação de depósitos minerais amostrados por suportes irregulares – o caso de estudo do depósito de Farim-Saliquinhé na Guiné-Bissau. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, p. 135.
- Barbosa, (2002). Contributo da geoestatística para o melhor conhecimento da situação geoambiental do sector de Algaes (minas de Aljustrel). Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, p. 125.
- Bigi, S., Conti, A., Casero, P., Ruggiero, L., Recanati, R., Lipparini, L. (2013). Geological model of the central Periadriatic basin (Apennines, Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 42: 107-121.
- Carvalho, J. (2003). Sísmica de alta resolução aplicada à prospecção, geotecnia e risco sísmico. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, p. 250.
- Carvalho, J., Berthou, P., Silva, L. (1990). Introdução aos Recursos Geotérmicos da Região de Lisboa. Book tribute to Carlos Romariz - Applied and Economical Geology Section, Lisbon, pp. 332-356.
- Carvalho, J., Cardoso, A. (1994). The Air Force Hospital Geothermal Project in Lisbon. *Geothermics'94 in Europe Document n°230*, Ed. BRGM, Orléans, France, pp. 441-448.
- Carvalho, J., Matias, H., Torres, L., Manupella, G., Pereira, R., Mendes-Victor, L. (2005). The structural and sedimentary evolution of the Arruda and Lower Tagus sub-basins, Portugal. *Marine & Petroleum Geology*, 22: 427-453.
- Carvalho, J., Rabeh, T., Cabral, J., Carrilho, F., Miranda, J. M. (2008). Geophysical characterization of the Ota-Vila Franca de Xira-Lisbon-Sesimbra fault zone, Portugal. *Geophysical Journal International*, 174: 567-584.
- Chalke, T., McGaughey, J. (2015). Realising the benefit of integrated interpretation in minimising 3D model uncertainty. In: *Saying Goodbye to a 2D Earth of Commission of Tectonics & Structural Geology (TecTask)*, Margaret River, Western Australia, 2-7 Agosto 2015.
- Correia, A., Ramalho, E., Rodrigues da Silva, A.M., Mendes-Victor, L.M., Duque, M.R., Aires-Barros, L., Santos, F.M., Aumento, F. (2002): “Portugal” In: *Atlas of Geothermal Resources in Europe* (Eds: Suzanne Hurter and Ralph Haenel), GGA, Hannover, Alemanha, 92 pp. + 89 plates; pp. 47-49.

- Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J. C. (Editores) (2013). *Geologia de Portugal, Volume II, Geologia Meso-cenozóica de Portugal*, Escolar Editora, ISBN 978-972-592-364-1, p. 798.
- Dias, R., Pais, J. (2009). Homogeneização da Cartografia Geológica do Cenozóico da Área Metropolitana de Lisboa (AML). *Comunicações Geológicas*, t. 96, pp. 39-50.
- Domzalski, W. (1969). Interpretation of an aeromagnetic survey offshore Portugal (1:200.000), Fairey Surveys Limited Report, Berkshire, England.
- Instituto Geológico e Mineiro (1999). Folha Geológica 34-C Cascais da Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Lisboa.
- Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2005). Folha Geológica 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Lisboa.
- Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2008). Folha Geológica 34-B Loures da Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Lisboa.
- Jessell, M. (2015). A History of 3D Geological Modelling. In: *Saying Goodbye to a 2D Earth of Commission of Tectonics & Structural Geology (TecTask)*, Margaret River, Western Australia, 2-7 Agosto 2015, p. 34.
- Krige, D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52 (6), pp. 119–139.
- Kullberg, J.C. (2000). *Evolução tectónica Mesozóica da Bacia Lusitaniana*. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, p. 361.
- Kullberg, J.C., Terrinha, P., Pais, J., Reis, R.P., Legoinha, P. (2006). Arrábida e Sintra: dois exemplos de tectónica pós rifting da Bacia Lusitaniana. In *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (Ed. Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C.). Univ. Évora, pp. 369-396.
- Kullberg, J.C., Machado, S. (2008). Cartografia geológica do Mesozóico na AML e aspectos relativos à normalização. In: C.N. Costa, (Ed.). *Conferência Regional Cartografia geológica aplicada a áreas urbanas. O caso da Área Metropolitana de Lisboa*. Quick Biz, Lisboa, pp. 49-61.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia (2011). *Notícia Explicativa da Folha 34B-Loures da Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Lisboa*, p 57.
- Landim, P. M. B. (2006). Sobre geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, 2(1):19-33.
- Leinfelder, R.R., Wilson, R.C.L. (1998). Third-order sequences in an Upper Jurassic Rift-related second-order sequence, Central Lusitanian Basin, Portugal. Graciansky, P.C., Hardenbol, J., Jacquin, T., Vail, P.R. (Editores), *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. Tulsa: SEPM, Special Publication, 60: 507-525.
- Lomholt, S., Rasmussen, E.S., Andersen, C., Vejbaek, O.V., Madsen, L. & Steinhardt, H. (1995). Seismic interpretation and mapping of the Lusitanian Basin, Portugal. Final Report, Proj. MILUPOBAS, Contract n° JOU-CT94-0348, GEUS, Copenhagen, p. 70.

- Lopez, S., Hamm, V., Le Brun, M., Scharper, L., Boissier, F., Cotiche, C., Giuglaris, E. (2010). 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France. *Geothermics*, 39 (4), 339-356.
- Luís, A. (2004). Utilização de informação auxiliar na estimação e simulação de variáveis regionalizadas. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, p. 210.
- Matias, F (2010). Modelação 3D de um Subsector das Mineralizações Auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo. Dissertação de mestrado, FCT-UNL, p. 121.
- Marrero Diaz, R., Costa, L., Duarte, E., Ramalho, C., Rosa, D. (2013). Principais características e limitações hidrogeológicas do Aquífero Cretácico Inferior da região de Lisboa para o seu aproveitamento como recurso geotérmico de baixa entalpia. In: 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas, APRH. Almada, pp. 47-48.
- Marrero Diaz, R., Ramalho, E., Costa, A., Ribeiro, L.; Carvalho, J., Pinto, C., Rosa, D., Correia, A. (2015). Updated Geothermal Assessment of Lower Cretaceous Aquifer in Lisbon Region, Portugal. In: Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, Extended abstract 16012, 19-25 de abril, p. 12.
- Matheron, G. (1965). Les variables regionalisees et leur estimation. Masson, Paris, p. 365.
- Monego, M., Ramos, P., Neves, M. (2007). Análise geoestatística de uma descarga de águas residuais. In: 2as Jornadas de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, ISBN 978-989-95557-1-6, pp. 163-168.
- Moniz, C. (2010). Contributo para o conhecimento da falha de Pinhal Novo-Alcochete, no âmbito da neotectónica do Vale Inferior do Tejo. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade de Lisboa, p. 128.
- Palacios, T. (1985). Petrologia do Complexo Vulcânico de Lisboa. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, p. 260.
- Pinto, C. (2011). Identificação de Estruturas com Potencial Sismogénico na Região do Vale Inferior do Tejo. Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora, p. 128.
- Ramalho, E. C. (2013). Sondagens Mecânicas e Prospeção Geofísica na Caracterização de Fluidos. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, p.186.
- Rasmussen, E. S., Lomholt, S., Andersen, C., Vejbak, O. V. (1998). Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. *Tectonophysics*, 300, 199-225.
- Rey, J. (1992). Les unités lithostratigraphiques du Crétacé inférieur de la région de Lisbonne. Com. Serv. Geol. Portugal, 78 (2), 103-124, Lisboa.
- Ribeiro, A., Silva, J. B., Cabral, J., Dias, R., Fonseca, P., Kullberg, M. C., Terrinha, P., Kullberg, J. C. (1996). Tectonics of the Lusitanian Basin. Final Report, Proj. MILUPOBAS, Contract nº JOU-CT94-0348, ICTE/GG/GeoFCUL, Lisboa, p. 126.

- Rocha, R. B., Marques, B. L., Kullberg, J. C., Caetano, P. C., Lopes, C., Soares, A. F., Duarte, L. V., Marques, J. F. & Gomes, C. R. (1996). The 1st and 2nd Rifting Phases of the Lusitanian Basin: Stratigraphy, Sequence Analysis and Sedimentary Evolution. Final Report, Proj. MILUPOBAS, Contract nº JOU-CT94-0348, UNLIS, Lisboa, p. 80.
- Rocha, R. B., Soares, A. F. (1984). Algumas reflexões sobre a sedimentação jurássica na orla meso-cenozoica ocidental de Portugal. Mem. Noticias, Universidade de Coimbra, 97: 133-142.
- Roxo, (2011). Integração de informação secundária na modelação geoestatística da qualidade de solos em locais potencialmente contaminados. Aplicação à área subjacente de uma antiga refinaria. Dissertação de mestrado, FCT-UNL, p. 64.
- Serviços Geológicos de Portugal (1955). Notícia Explicativa da Carta geológica de Portugal, 1/50 000 Folha 30-C Torres Vedras. Lisboa, p. 33.
- Serviços Geológicos de Portugal (1986). Carta Geológica do Concelho de Lisboa, escala 1/10.000, folha 3.
- Serviços Geológicos de Portugal (1993). Notícia Explicativa da Folha 34A-Sintra da Carta Geológica de Portugal 1:50 000, Lisboa, p.77.
- Soares, A. (2006). Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. IST Press, Lisboa, Portugal, p.214.
- Soares, A. (2009). Special Issue on Geostatistics for Environmental Applications. Mathematical Geosciences 41(3): 239-241.
- Terrinha, P., Aranguren, A., Kullberg, M. C., Pueyo, E., Kullberg, J. C., Casas Sainz, A. M., Rillo, C. (2003). Complexo ígneo de Sintra: um modelo de instalação constrangido por novos dados de gravimetria e ASM. In: VI Congresso Nacional de Geologia, Monte de Caparica, 4-6 Junho 2003. Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, pp. D96-D100.
- Turrini, C., Lacombe, O., Roure, F. (2014). Present-day 3D structural model of the Po Valley basin, Northern Italy. Marine and Petroleum Geology, 56: 266-289.
- Ungemach, P., Hidalgo, R., Sanchez, J.S. (2010). Multiple Use Assessment of the Madrid Basin (Spain) Geothermal Potential. Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 Abril 2010.
- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S., Graziano, G. (2009). 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. Computers & Geosciences, 35: 49-69.

ANEXOS

ANEXO I. Tabelas litostratigráficas das folhas 34-A Sintra, 34-B Loures, 34-C Cascais e 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal, escala 1: 50 000.

E: Espessura média estimada a partir das descrições nas notícias explicativas das respetivas folhas. U: Correspondência com as unidades litostratigráficas selecionadas no presente estudo para a obtenção do modelo geológico 3D: 1-Miocénico; 2-Paleogénico; 3-CVL-MSVS; 4-Bica; 5-Caneças; 6-Almargem; 7-Barremiano-Berriasiano; 8-Jurássico Superior.

	Era	Sistema	Série	Andar	Formação	E (m)	Litologia	U
34 - A	Cenozóico	Quaternário	Holocénico		Ad; d; A; a		Areias de dunas; dunas; Areias de praia; aluviões	
			Plistocénico		dc Q		Dunas consolidadas Areias e cascalheiras	
		Neogénico	Miocénico		M^3_I ; M^3_m	12	Calcários com fósseis	1
		Paleogénico	Oligocénico		Ø	100	Arenitos e conglomerados com argilas e calcários	2
	Mesozóico	Cretácico	Superior	Senoniano	β^1		Sienitos, granitos, gabro-dioritos	3
				Cenomaniano Superior	C^3_C	40	Calcários com fósseis	4
			Inferior	Cenomaniano Inferior e Médio - Albiano	C^2_{AC}	342	Calcários e margas	5
				Aptiano Superior	C^1_{AS}	40	Arenitos e argilas	6
				Aptiano Inferior	C^1_A	60	Calcários e margas com fósseis	
				Barremiano Superior	C^1_{Ba}	18	Arenitos, argilas e dolomitos	
				Barremiano Inferior - Hauteriviano Superior	C^1_{HBa}	130	Calcários recifais e com fósseis	7
				Hauteriviano	C^1_{Hc} ; C^1_{Ht}	19	Calcários e margas com fósseis	
				Valangiano (e Berriasiano Superior)	C^1_V	77	Calcários, margas e arenitos	
				Berriasiano	C^1_{Be}	30	Calcários e margas com fósseis	8
		Jurássico	Superior		J	1940	Calcários	

34 - B	Era	Sistema	Série	Andar	Formação	E (m)	Litologia	U
	Cenozóico	Quaternário	Holocénico		a		Aluviões	
			Plistocénico		Q _i ; Q _f ; Q _f		Areias, cascalheiras, dunas	
		Neogénico	Miocénico	Tortoniano - Serravaliano	M _{CR} ; M _{BP} ; M _{Mv}	51	Areias e calcários; Biocalcarenitos, arenitos e argilitos	1
				Serravaliano - Langhiano	M _{Gr} ; M _{Xa} ; M _{QC}	44	Arenitos; Argilas; Biocalcarenito	
				Langhiano	M _{Mu} ; M _{VC}	40	Biocalcarenito; Areias	
				Burdigaliano	M _{Es} ; M _{Ec} ; M _{FT} ; M _{QB}	128	Areias, argilitos, biocalcarenitos	
				Burdigaliano - Aquitaniano	M _{CV} ; M _{Pm}	45	Argilas e margas	
		Paleogénico	Oligocénico a Eocénico		Φ _{Bf}	400	Conglomerados, arenitos e argilitos	2
		Mesozóico	Cretácico	Superior	Senoniano	β	10-400	Escoadas basálticas, piroclastos e sedimentos
Cenomaniano Superior	C ² _{Bi} ; C ² _{Fa}				53	Calcários com rudistas; Conglomerados	4	
Inferior	Cenomaniano Inferior e Médio - Albiano			C ² _{GC}	350	Calcários, margas, arenitos e dolomitos	5	
	Cenomaniano Inferior e Médio - Aptiano Superior			C ¹ _{Ro}	40	Arenitos, pelitos e conglomerados	6	
	Aptiano Inferior - Barremiano Superior			C ¹ _{Cr}	5	Arenitos, pelitos e margas		
	Aptiano Inferior - Barremiano			C ¹ _{Re}	9	Arenitos, conglomerados, pelitos e dolomitos		
	Barremiano Inferior - Berriasiano Superior (?)			C ¹ _{VL} ; C ¹ _{SC} ; C ¹ _{RR}	85	Dolomitos; Arenitos, pelitos; Calcários e margas;	7	
	Berriasiano Inferior - Titoniano (?)			C ¹ _{Se}	40	Calcários e margas; Arenitos, pelitos		
Jurássico	Superior				J	2410	Margas, calcários, siltitos, arenitos	8

34 - C	Era	Sistema	Série	Andar	Formação	E (m)	Litologia	U
	Cenozóico	Quaternário	Holocénico		ad; d; A; a		Areias, dunas, aluviões	
			Plistocénico		Q		Areias e cascalheiras	
		Neogénico	Miocénico	Burdigaliano Inferior	M ^e _{III}	25	Calcários	1
				Aquitano	M ^I _{II}	35	Calcários, cascalheira, margas	
					M ^I _I	33	Argilas, margas e calcários	
		Paleogénico	Oligocénico a Eocénico		Φ	3	Cascalheiras argilosas	2
	Mesozóico	Cretácico	Superior	Senoniano	β ¹	10-400	Basaltos, piroclastos, brechas, traquitos	3
				Cenomaniano Superior	C ³ _C	8	Calcários com fósseis	4
			Inferior	Cenomaniano inferior a médio - Albiano	C ² _{AC}	310	Calcários e margas	5
				Albiano Inferior - Aptiano Inferior	C ¹ _{AS}	34	Arenitos e argilas	6
				Aptiano Inferior	C ¹ _A	66	Calcários e margas com fósseis	
				Barremiano Superior	C ¹ _{Ba}	21	Arenitos, argilas e dolomitos	
				Barremiano Inferior - Hauteriviano	C ¹ _{HBa}	119	Calcários recifais e com fósseis	7
				Hauteriviano Inferior	C ¹ _H	15	Margas e calcários margosos	
				Valanginiano	C ¹ _V	152	Calcários, margas e arenitos	
				Berriasiano	C ¹ _{Be}	50	Calcários e margas com fósseis	8
		Jurássico	Superior		J	2031	Calcários compactos e margosos	

34 - D	Era	Sistema	Série	Andar	Formação	E (m)	Litologia	U
	Cenozóico	Quaternário	Holocénico		a	58	Aluviões, aterros	
		Neogénico	Miocénico	Tortoniano Inferior - Serravaliano Superior	$M_{Mv}; M_{BP}; M_{CR}$	36	Argilitos; Arenitos; Biocalcarenitos	1
				Serravaliano - Langhiano Superior	$M_{QC}; M_{Xa}; M_{Gr}$	544	Argilas siltosas; Biocalcarenitos	
				Langhiano	$M_{Mu}; M_{VC}$	306	Biocalcarenitos; Areias	
				Burdigaliano	$M_{Es}; M_{Ec}; M_{FT}; M_{QB}; M_{CV}; M_{Pm}$	2121	Areias, biocalcarenitos, argilitos, calcários	
				Burdigaliano Inferior - Aquitaniano	M_{Pr}	45	Argilas e margas	
		Paleogénico	Oligocénico a Eocénico		Φ_{Bf}	425	Arenitos, calcários, margas, conglomerados	2
	Mesozóico	Cretácico	Superior	Senoniano	β	20-200	Escodas basálticas, piroclastos e sedimentos	3
				Cenomaniano Superior	C^2_{Bi}	50	Calcários com rudistas	4
			Inferior	Cenomaniano Médio - Albiano Superior	C^2_{Cn}	250	Calcários e margas	5

ANEXO 2. Fotografias do aspeto em afloramento de algumas das formações identificadas na área de estudo durante duas saídas de campo realizada em maio de 2015.



Foto 1 – Aspeto em afloramento dos arenitos piritosos da formação de *Vale de Lobos* (Berriasiano médio - Valanginiano inferior) na zona norte da área de estudo.



Foto 2 – Aspeto em afloramento dos calcários compactos esbranquiçados da formação de *Bica* (Cenomaniano Superior) na zona centro da área de estudo.



Foto 3 – Aspeto em afloramento dos conglomerados, arenitos e argilitos da formação de *Benfica* (Eocénico – Oligocénico) na zona centro da área de estudo.

ANEXO 3. Aspeto inicial e final das unidades litostratigráficas 6 e 7, obtidas da cartografia geológica na escala 1: 50 000.

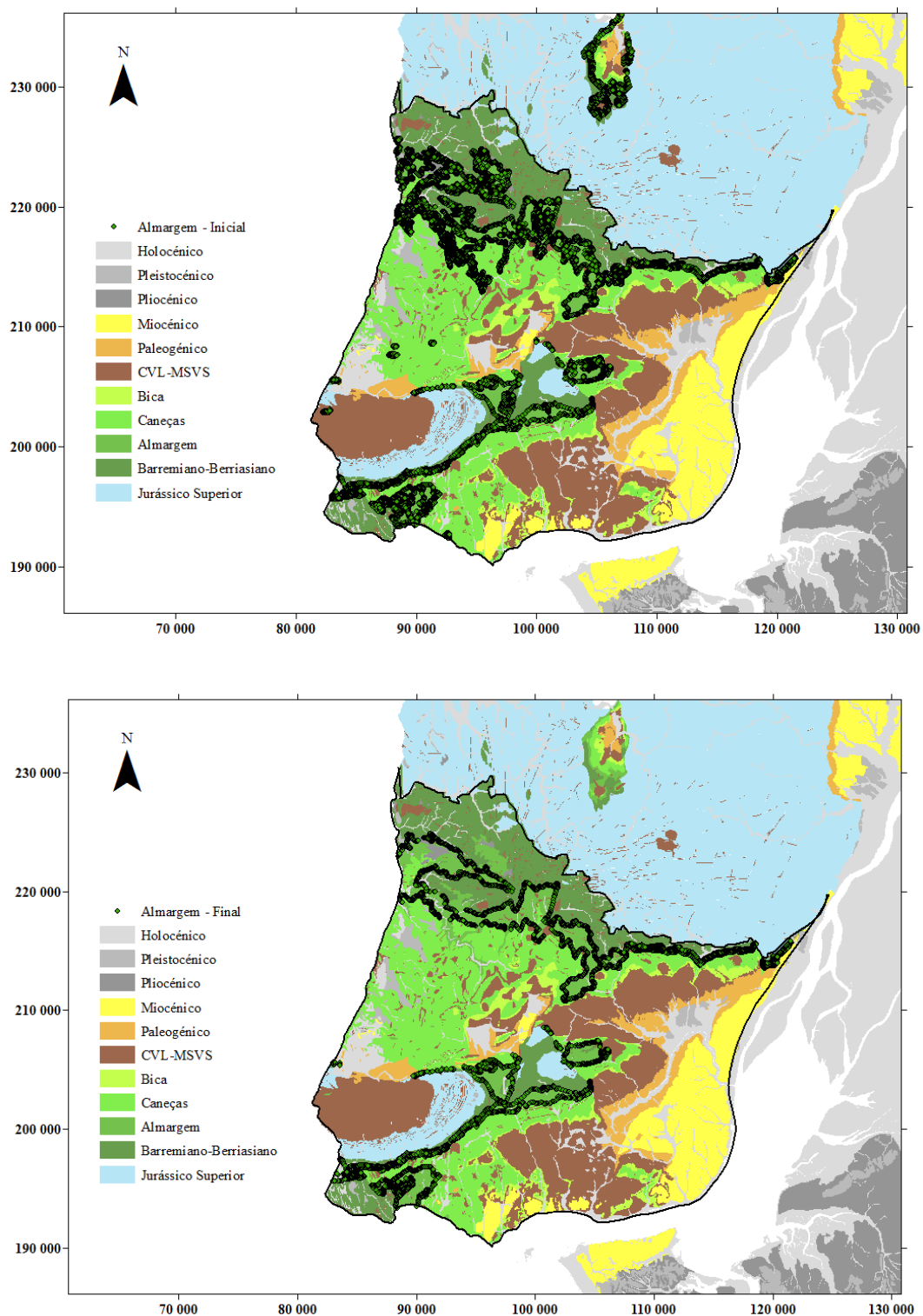


Figura A.1 - Aspeto da unidade litoestratigráfica 6-Alargem (Albiano/Aptiano – Barremiano Superior) antes (acima) e depois (baixo) da eliminação dos pontos pouco representativos dos seus limites. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

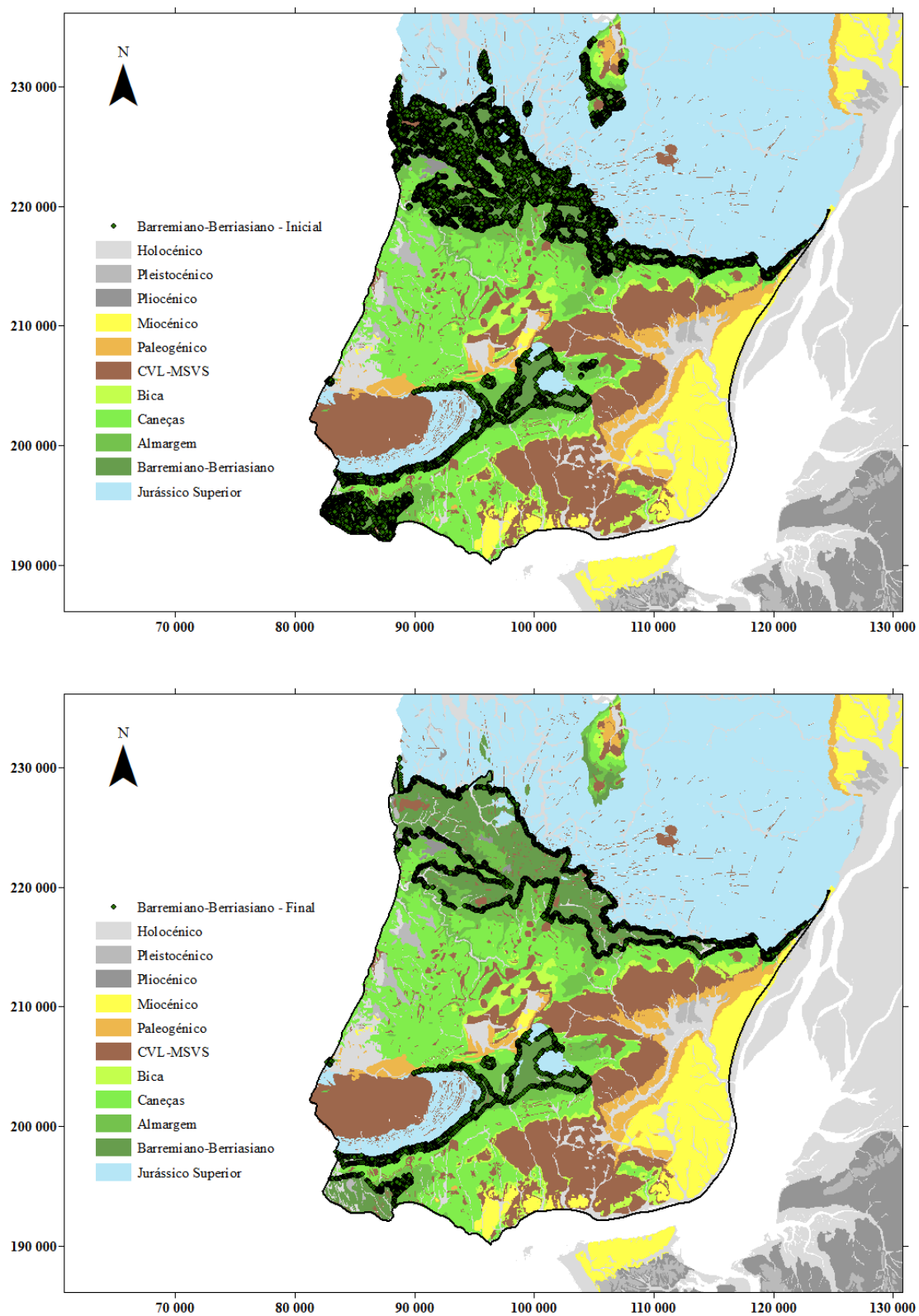


Figura A.2 - Aspeto da unidade litoestratigráfica 7-Barremiano-Berriasiano antes (acima) e depois (baixo) da eliminação dos pontos pouco representativos dos seus limites. Sistema de coordenadas Lisboa Hayford Gauss IGeoE.

ANEXO 4. Fundamentos teóricos geoestatísticos

Conceitos gerais

Como já foi referido no Capítulo 1 (1.1), a modelação geoestatística apoia-se na teoria das funções aleatórias. Estas podem ser definidas como conjuntos de variáveis aleatórias $z(x_i)$ relacionadas entre si, sendo necessário admitir a estacionariedade de 1ª e 2ª ordem para inferir os estatísticos básicos.

A estacionariedade da média ou de 1ª ordem considera que todas as variáveis aleatórias têm a mesma média, como se traduz matematicamente por:

$$E\{z(x_1)\} = E\{z(x_2)\} = E\{z(x_i)\} = m, \text{ com}$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(x_i)$$

A estacionariedade do variograma ou de 2ª ordem admite que a correlação entre duas variáveis aleatórias é independente da sua localização, dependendo apenas da distância h que as separa, e é traduzida por:

$$C(Z(x_1), Z(x_2)) = C(Z(x_i), Z(x_{i+h})) = C(h)$$

$$\gamma(Z(x_1), Z(x_2)) = \gamma(Z(x_i), Z(x_{i+h})) = \gamma(h)$$

em que:

- $h = x_1, x_2 = x_i, x_{i+h}$;
- C é a covariância;
- γ é o variograma.

A variografia é um instrumento geoestatístico que permite caracterizar e quantificar a continuidade espacial da variável em estudo, ou seja, avaliar o modo como se esta se comporta no espaço, e também o seu modo de dispersão. Além disso, serve de base à estimação e simulação (Baldé, 2012).

No presente trabalho recorreu-se à ferramenta semi-variograma, aqui designada variograma e representada por $\gamma(h)$, para quantificar a continuidade espacial. Segundo Soares, (2006) o variograma é calculado pela média aritmética do quadrado das diferenças de todos os pares de pontos separados de um vetor de módulo h , como se traduz na seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_\alpha) - Z(x_\alpha + h)]^2,$$

sendo $h = x_1, x_2 = x_\alpha, x_{\alpha+h}$ e $N(h)$ o número de pares de pontos separados de h .

A representação do variograma corresponde a um gráfico que relaciona os valores de $\gamma(h)$ com os possíveis valores de h , numa ou várias direções do espaço previamente definidas.

Soares (2006) refere que após o cálculo dos valores dos variogramas experimentais é necessário ajustá-los por uma curva atenuada média, ou seja, uma função teórica que permite quantificar e sintetizar a continuidade espacial de $Z(x)$. Os modelos de funções aplicáveis à geoestatística têm necessariamente que ser positivos, pelo que a escolha fica limitada a quatro possibilidades: modelo esférico, exponencial, Gaussiano e de potência.

No âmbito deste trabalho optou-se por recorrer aos modelos esférico e Gaussiano, sendo ambos funções dos parâmetros patamar (C), amplitude (a), e passo (h). Estes modelos são determinados, respetivamente, pelas seguintes equações:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{se } h \leq a \\ C & \text{se } h > a \end{cases}$$

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right) \right]$$

Em que C é o limite para o qual os valores de $\gamma(h)$ tendem com o incremento de h , e a corresponde à distância máxima de correlação para os valores de $Z(x)$.

O ajuste dos variogramas considera ainda o parâmetro efeito de pepita (C_0), nos casos em que a ordenada na origem do gráfico de variograma é não-nula, o que na prática geoestatística se verifica quase sempre e pode estar relacionado com sobreposição de microestruturas geológicas ou erros de amostragem.

Na Figura A.3 apresenta-se uma representação genérica do gráfico de um variograma e dos parâmetros que lhe estão associados. Note-se que até atingir a amplitude, os valores de $Z(x)$ estão correlacionados.

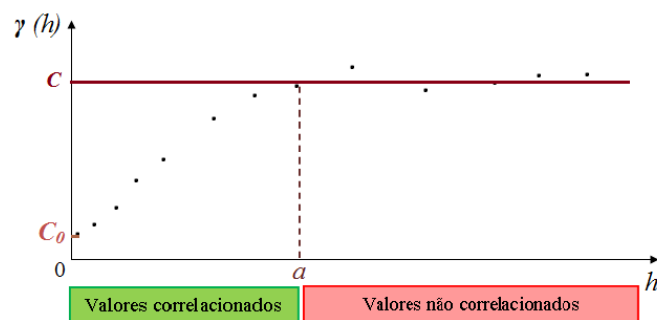


Figura A.3 - Representação genérica do gráfico de um variograma e dos parâmetros associados.

A anisotropia significa, na prática, que a variável em estudo apresenta variação da continuidade espacial, estendendo-se preferencialmente numa determinada direção. A anisotropia verifica-se quando os variogramas apresentam um comportamento distinto consoante as direções consideradas, sendo as convenções direcionais utilizadas na geoestatística, correspondentes aos vários quadrantes, as que se apresentam de seguida.

Tabela A.1 - Convenções direcionais da geoestatística

Direção	Convenção	Quadrante
0	0°	N-S
45	45°	NE-SW
90	90°	E-W
-45	135°	NW-SE

Existem dois tipos de anisotropia: geométrica e zonal. Segundo Soares (2006) a primeira caracteriza-se por os variogramas serem ajustados pelo mesmo modelo e terem o mesmo patamar, mas amplitudes diferentes, em todas as direções. Já a anisotropia zonal é caracterizada por os variogramas terem, pelo menos, duas estruturas com patamares e amplitudes diferentes consoante a direção considerada.

Estimação

A geoestatística permite estimar grandezas em locais não amostrados, com base num conjunto de valores conhecidos (ou seja, amostrados).

A *krigagem* é um conjunto de processos de estimação linear geoestatística que permitem atingir esse objetivo. Segundo Roxo (2011) os procedimentos de *krigagem* assentam numa interpolação por média móvel ponderada, em que os pesos atribuídos às amostras são determinados a partir da análise espacial do variograma experimental.

Existem vários algoritmos de *krigagem*, que assumem diferentes pressupostos e têm especificidades mais adequadas a cada caso em estudo. No âmbito deste trabalho recorreu-se à *krigagem* ordinária ou normal, *krigagem* simples com médias locais e *co-krigagem* co-localizada.

Krigagem ordinária

No presente trabalho pretende-se, numa primeira etapa, obter uma representação subsuperficial da geometria do topo da unidade litostratigráfica **6-Almargem**, tendo-se considerado como algoritmo mais adequado o da *krigagem* ordinária para gerar uma superfície contínua e média.

A opção por esta variante da *krigagem* assentou no facto de se assumir que, na área em estudo, esta unidade apresenta valores de cota que no conjunto têm um comportamento homogéneo, permitindo considerar uma média desconhecida mas constante da variável, em toda a área considerada.

Os processos de estimação por *krigagem* ordinária baseiam-se numa combinação linear de valores conhecidos:

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

em que $[Z(x_0)]^*$ é o estimador, $Z(x_0)$ é o valor a estimar, localizado genericamente em x_0 e $Z(x_{\alpha})$ são os valores conhecidos, localizados em x_{α} .

Os ponderadores, λ_{α} , devem exprimir a distância estrutural entre valores amostrados em relação ao ponto a estimar e contrariar o efeito de enviesamento causado por agrupamentos preferenciais de amostras. O formalismo geoestatístico para a determinação de λ_{α} baseia-se nos critérios de não-enviesamento e variância de estimação mínima.

- O não-enviesamento assume que a média dos estimadores é igual à média dos valores observados, o que implica que a média do erro de estimação seja nula, como se traduz-se matematicamente por:

$$E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$$

A estacionariedade de 1ª ordem da função aleatória implica que a soma dos ponderadores seja unitária:

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$$

- A variância de estimação mínima expressa que a média do quadrado dos erros de estimação deve ser mínima, ou seja:

$$\min E\{[\varepsilon(x_0)]^2\}$$

em que $\varepsilon(x_0)$ é o erro ou desvio de estimação, i.e. a diferença entre o valor estimado e o valor observado.

Krigagem simples com médias locais

A estimação por *krigagem* simples com médias locais é útil quando se pretende impor uma média global, conhecida e constante, aos valores estimados, daí ter sido considerada para o aprimoramento das superfícies geradas tanto para a unidade **6**, como para a unidade **7-Barremiano-Berriasiano**.

A *krigagem* simples com médias locais assenta numa combinação linear de N+1 valores, em que N ou $Z(x_{\alpha})$ são os valores conhecidos, e a média.

Tal como na *krigagem* ordinária, este algoritmo considera a estacionariedade da média e a minimização da variância. A soma dos N+1 ponderadores tem de ser unitária para assegurar a estacionariedade de 1ª ordem da função aleatória:

$$\sum_{\alpha}^{N+1} \lambda_{\alpha} = 1$$

O estimador de *krigagem* simples com médias locais obtém-se pela expressão:

$$[Z(x_0)]^* = m + \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} [Z(x_{\alpha}) - m] = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} \right] m$$

em que m é a média, λ_{α} são os ponderadores e $Z(x_{\alpha})$ são os valores conhecidos.

A principal limitação deste método está relacionada com a imposição de médias locais do conjunto de dados das *grids* “soft data”, que pode conduzir a resultados pouco representativos da realidade. Quando esta circunstância se verifica, é comum reintroduzir informação que já havia sido considerada para gerar o modelo.

Co-krigagem co-localizada

A *co-krigagem* é a denominação para estimador linear geoestatístico, com variáveis secundárias, sendo na prática uma extensão da *krigagem*. Esta técnica pode ser utilizada, segundo Soares, (2006) nas situações em que existe além da variável principal que se pretende estimar, uma variável secundária com densidade de amostragem superior, desde que exista alguma correlação entre as variáveis.

No presente trabalho pretende-se, após ter uma representação aceitável e bem controlada pela variografia da geometria do topo da unidade litostratigráfica **6**, estimar o topo da unidade **7** de modo a que este respeite o resultado da modelação da unidade anterior. Verificou-se então que a correlação entre estas duas unidades é muito elevada, o que permitiria recorrer à *co-krigagem*.

No entanto, como foi explicado na metodologia (Ver subcapítulo 4.1), a estimação das cotas do topo da unidade **7** foi obtida considerando-se apenas parte da informação disponível. Esta escolha conduziu a um conjunto reduzido de amostras nesta unidade para a situação de partida, em comparação com as amostras da unidade **6**, tendo-se considerado mais adequado recorrer ao método de *co-krigagem* co-localizada, dado que de acordo com Soares, (2006), esta é uma variante que se utiliza quando a variável secundária é sobreabundante em relação ao número de amostras da variável principal.

Assim, a aplicação deste método permitiu assegurar uma maior coerência nos resultados, evitando-se sobreposições desta unidade, mais antiga na sequência estratigráfica, com a **6**.

O estimador de *co-krigagem* co-localizada retém apenas os valores da variável secundária, ou seja, estes são considerados em todos os nós da malha, como é expresso na equação seguinte:

$$[Z_1(x_0)]^*_{CK} = \sum_{i=1}^{N_1} a_i Z_1(x_i) + b_0 Z_2(x_0)$$

em que: $Z_1(x)$ é o valor que se pretende estimar da variável principal, cujos valores são conhecidos em N_1 amostras, e têm um peso de a ; $Z_2(x)$ é o valor da variável secundária, estimada para um peso b .

Este estimador deve ser descrito por covariância sempre que as variâncias das variáveis sejam diferentes, daí a designação de pesos em detrimento de ponderadores.

Tal como na *krigagem*, assumem-se igualmente os pressupostos de não-enviesamento e variância de estimação mínima. A soma dos $N+2$ pesos tem de ser unitária para assegurar a estacionariedade de 1ª ordem da função aleatória, resultando:

$$\sum_{\alpha}^{N_1} \alpha_i + b_0 = 1$$